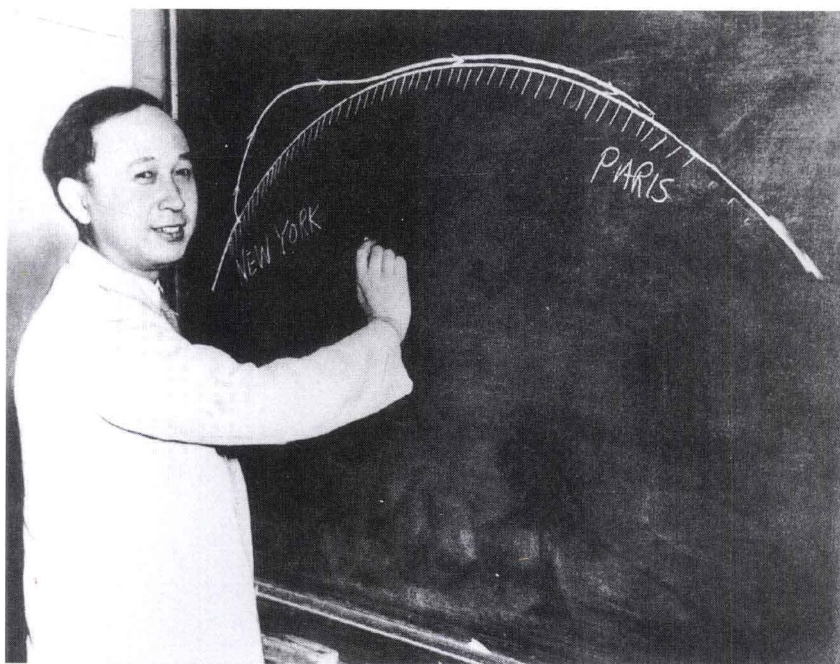
内 容 提 要

本书辑录了“钱学森科学贡献暨学术思想研讨会”特邀报告及由中国科学院、中国工程院、国防科工委和中国科学技术协会推荐的专家学者撰写的论文共67篇文章，多角度地介绍了钱学森主要学术思想体系的形成和发展过程，展望了相关学科的发展前景。



钱学森

中国科学技术协会名誉主席



◀ 图2　20世纪40年代末钱学森在美国加州理工学院讲课



▲ 图3　1956年2月钱学森出席全国政协第二届全国委员会第二次全体会议，2月1日毛主席设宴招待全体委员时，安排钱学森坐在自己旁边

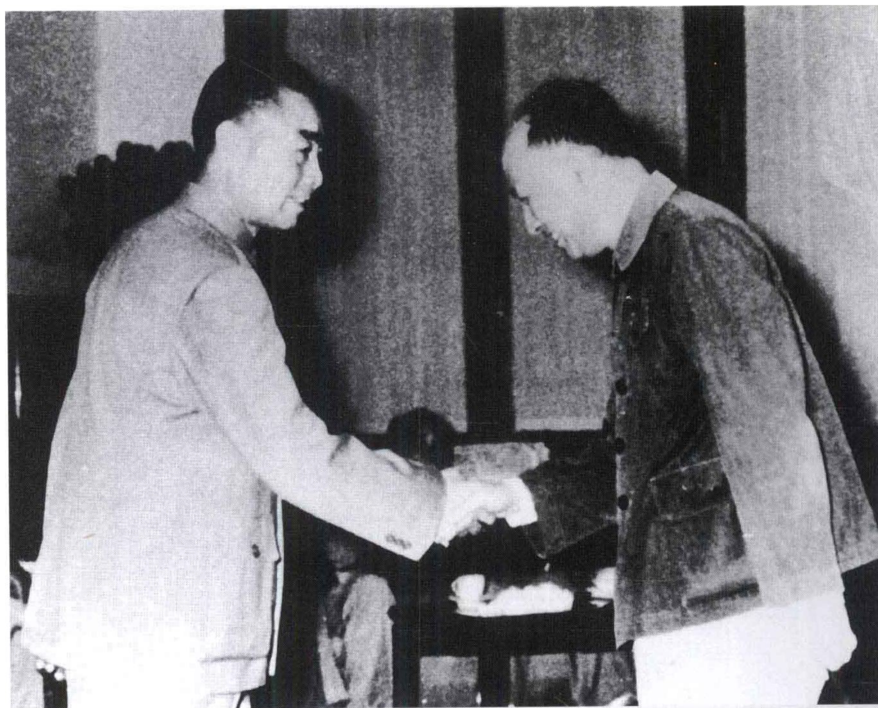
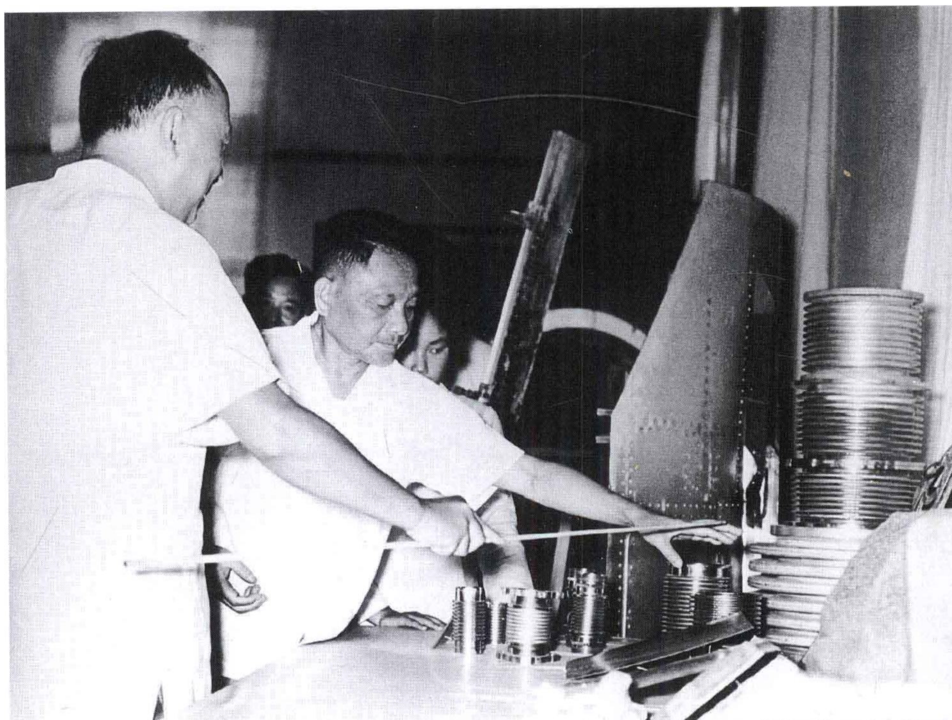


图4　20世纪60年代初周恩来会见钱学森 ►



▲ 图5　20世纪60年代初，邓小平到七机部视察，钱学森在向邓小平介绍火箭发动机



图6 1991年钱学森获荣誉称号以后，江泽民总书记向他表示祝贺



图7 1999年12月8日，江泽民总书记亲自登门看望88岁高龄的钱学森



▲ 图8　1966年钱学森陪同聂荣臻在基地主持“两弹”结合飞行试验



▲ 图9　1996年8月27日，中共中央书记处书记温家宝看望钱学森



▲ 图 10　1999 年 9 月 18 日，中共中央、国务院、中央军委授予钱学森“两弹一星功勋奖章”。授奖大会后，全国政协副主席、著名核物理学家朱光亚（左二），中央军委委员、总装备部部长曹刚川上将（右一），总装备部政委李继耐上将（左一）在钱学森家，将“两弹一星功勋奖章”及获奖证书呈交钱老(右二是钱老的夫人，著名声乐家蒋英教授)



▲ 图 11　2001 年 4 月 30 日，90 岁高龄的钱学森，在家里听取戴汝为院士和于景元、涂元季三人汇报从定性到定量综合集成体系研制情况



▲ 图 12　1991 年钱学森荣获“国家杰出贡献科学家”荣誉称号（左边是钱老的夫人蒋英教授）



图 13　年近 90 岁高龄的钱学森仍在家里认真学习和工作 ▶

钱学森简历

钱学森，1911年12月11日生于上海，1934年上海交通大学毕业。1936年在美国麻省理工学院获航空硕士学位。1939年在美国加州理工学院获航空、数学博士学位；1939～1946年在加州理工学院任教至副教授。1946～1949年在麻省理工学院任教至教授。1949～1955年在加州理工学院任教授兼喷气推进中心主任。1955年回国，组建中国科学院力学研究所并任所长。1956～1965年任国防部第五研究院院长、副院长；1965～1970年任七机部副部长。1970～1982年任国防科委副主任；1982～1987年任国防科工委科技委副主任；1987～1998年任国防科工委科技委高级顾问。1998年至今为中国人民解放军总装备部科技委高级顾问。

1956～1980年任中国科协第一届全国委员会委员；1980～1986年任中国科协第二届副主席；1986～1991年任中国科协第三届主席；1991年至今是中国科协名誉主席。

1986～1998年任全国政协第六、七、八届副主席。

1957年当选为中国科学院学部委员（1994年改为院士）；1994年当选为中国工程院院士。1998年转为中国科学院和中国工程院两院的资深院士。

1957年获中国科学院自然科学奖一等奖；1979年获美国加州理工学院杰出校友奖；1985年获全国科技进步奖特等奖；1989年获国际技术与技术交流大会授予的“小罗克韦尔奖章”和“世界级科学与工程名人”、“国际理工研究所名誉成员”称号；1991年获国务院、中央军委授予的“国家杰出贡献科学家”荣誉称号和一级英模奖章；1994年获何梁何利基金优秀奖；1999年获中共中央、国务院、中央军委授予的“两弹一星功勋奖章”。

《钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集》

编辑委员会

顾　　问： 周光召　宋　健　朱光亚　刘积斌　路甬祥

主　　编： 宋　健

常务副主编： 张玉台

副 主 编：（按姓氏笔画排序）

王淀佐　冯长根　许智宏　栾恩杰

编　　委：（按姓氏笔画排序）

马　阳　王淀佐　冯长根　白玉良　成　森
许智宏　张玉台　李　士　李仁涵　李慧政
吴伟仁　周先路　赵世荣　涂元季　栾恩杰
盛海涛　颜　实

编辑小组

组　长： 马　阳

成　员：（按姓氏笔画排序）

马　阳　王文静　任杏华　李慧政　张秀智
张晓林　宋德雄　瓮巧玲　屈惠英　周　济
金维克　赵勇强　赵崇海　涂元季　鲁颖淮

出版说明

钱学森同志是一位世界著名的科学家，是我国科技工作者的优秀代表。他为我国科学技术、特别是国防科技事业的发展做出了巨大贡献，曾由党中央、国务院、中央军委授予“国家杰出贡献科学家”荣誉称号及“两弹一星功勋奖章”。2001年12月11日是钱学森九十周岁寿辰，为宣传钱学森同志对我国科技事业，特别是“两弹一星”事业做出的杰出贡献，总结他的科学思想，宣传他热爱祖国，热爱党，热爱社会主义事业，献身科学，开拓创新的优秀品德，中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院、国防科工委于2001年12月10日在北京联合举办钱学森科学贡献暨学术思想研讨会，并在会前编辑出版了这部《钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集》。这对于实践“三个代表”重要思想，弘扬爱国主义精神，激励中青年科技工作者继承和发扬老一辈科学家的优良传统，推动科技事业发展，有着重要的现实意义。

论文集中收录了研讨会大会特邀报告全文以及由中国科学院、中国工程院、国防科工委和中国科学技术协会推荐的专家学者撰写的论文共67篇文章，多角度地介绍了钱学森不同时期的科学研究历程，探讨了钱学森主要学术思想体系的形成和发展过程，展望了相关学科的发展前景。从这些文章中，不仅使我们看到了钱学森作为世界级的科学巨匠对中国的科技事业颇具远见卓识的一面，也看到了他在科学探索的道路上孜孜不倦、毕生以求的精神。很多文章作者通过回顾与钱学森的往来书信、谈话内容，甚至是点滴小事，反映了钱学森热爱祖国、献身科学、平易近人的种种优秀品德。期望广大读者阅读后能获得收益和启迪。

由于时间紧迫，书中难免存在若干疏漏，请作者和读者鉴谅。另外，中国科学技术出版社对此书的编辑出版工作给予了大力协助，在此表示衷心的感谢。

本书编辑委员会

目　　录

特邀报告

专家文选

特　邀　报　告

科学技术的巨擘　中国人民的骄傲

宋　健

2001年12月11日是钱学森院士九十华诞。我们怀着十分高兴的心情在这里聚会，向他表示衷心的祝贺和祝福。

钱老是我国杰出的科学家。他早年在美国学习和工作20年，在应用力学、空气动力学和航空工程、喷气推进和航天技术、工程控制论等技术科学领域做出了许多开创性的贡献。1955年，他冲破重重阻力毅然回到祖国。他满怀对祖国、对人民的深情热爱，几十年如一日地投身于我国科技发展和国防科研事业，为祖国奉献了他的全部智慧和力量，在老一辈无产阶级革命家的领导下，钱老以他渊博的知识、勇于创新的科学精神和对人民事业的热忱，为我国火箭、导弹和航天事业的创建与发展做出了重大的历史性贡献，是中国"两弹一星"伟大成就的元勋。他对伟大祖国和人民的无限忠诚和巨大奉献赢得了全中国科学技术界和人民群众的敬佩和热爱。他在现代科学技术诸多领域的杰出贡献也赢得了全世界科学技术界的尊重和赞扬，是一位在国内外享有很高声誉、德高望重的世界级科学家。今天，我们在这里共同回顾他几十年走过的历程以及他对人类和祖国科学技术事业发展的贡献，研究他的学术思想，以表达我们对他的敬意和九十华诞的祝福。

90年前，钱老出生于上海。1929年考入上海交通大学机械工程系。1934年考取清华大学公费留学生。1935年赴美国麻省理工学院航空系学习，1936年获硕士学位。后转至加州理工学院，师从世界力学大师冯·卡门(von Karman)从事应用力学研究，1939年获航空、数学博士学位。1946年又回到麻省理工学院任教，1947年36岁时晋升为正教授，1949年再回到加州理工学院。1948年中国解放战争胜利的前夕，他开始准备回归祖国，为此退出了美国空军科学咨询团，辞去美国海军炮火研究所顾问职务。但是由于受到当时美国政府的阻挠和迫害，被扣留长达5年之久。在党中央、毛主席和周总理的亲切关怀下，钱老于1955年10月回到祖国，并立即投入祖国的科技发展和国防科技建设事业。回国后，他与钱伟长先生共同筹组了中国科学院力学研究所，并担任首任所长，成为中国力学学会、中国自动化学会的第一任理事长。1956年出任国防部第五研究院院长，主持创建了中国火箭、导弹和航天事业第一个研究机构。1958年开始，主持了中国科学院卫星技术领导小组，开创了中国空间技术的研究，后来出任空间技术研究院第一任院长。1965年以后，担任第七机械工业部副部长、国防科工委副主任，长达22年之久，一直是领导中国航天科学技术事业的科学主帅。

为了表彰钱老为祖国科技事业的发展做出的卓越贡献，1991年国务院、中央军委授予

他“国家杰出贡献科学家”称号。他是获得这一殊荣的中国惟一科学家，同时授予他全军一级英模奖章。1999年，中共中央、国务院、中央军委授予他“两弹一星功勋奖章”。由于他在科学研究和工程技术多方面的杰出成就和贡献，中国和美国的学术机构和国际学会多次授予他科学技术奖励，赋予他“世界级科学与工程名人”称号。

钱老90年所走过的充满艰辛、奋斗和辉煌成就的历程，是中国现代科学技术从无到有、从弱到强发展过程的缩影。他是20世纪中国先进知识分子的卓越代表和发展中国科技事业的坚定旗手。

钱老是中国先进知识分子中坚持以马克思主义的辩证唯物论哲学指导科学技术实践的优秀代表。正如他在给一位朋友的信中所说：“我近30年来一直在学习马克思主义哲学，并总是试图用马克思主义哲学指导我的工作。马克思主义哲学是智慧的源泉。”他不断地、反复地公开申明自己的信念：所有当代科学技术学科都应该归入到马克思主义辩证唯物论哲学指导下的知识体系的网络之中，在马克思主义哲学原理的指导下，科学研究和工程技术就能够取得真正的新成就，否则就可能走弯路或步入歧途。马克思主义哲学的正确性，已经被20世纪世界自然科学和技术科学的广泛实践和伟大成就所证实。他公开申明并要求科技界处处坚持以马克思主义哲学指导自己的科技活动，是出于他深厚的科学知识，对世界自然科学成就的充分把握，对自己半个世纪之久的科学研究、科学试验、技术实践的经验总结，以及由此产生的对马克思主义哲学坚定不移的信念。

钱老比科学界大多数人更深刻地感到，“实践是检验真理的惟一标准”、“实事求是”这些哲学观点是现代科学技术千百次证明了的真理。他青年时代学的是工程技术，而实事求是、经得起实践的检验是技术科学的灵魂。无论在早期还是后来的研究工作中，他一直注意通过科学试验核对数据后才肯定理论和推论的正确与否。早在1939年，他和冯·卡门的著名论文“可压缩流体的二维亚声速流”中提出的Karman－钱近似公式，只是在经过风洞试验结果肯定后，才正式作为后来广泛应用于机翼设计、制造的标准计算方法。在领导和主持规划及研制火箭、导弹、卫星工作中，在数百次靶场发射试验中，他坚持科学原理和中国的客观实际相结合，从不愿听虚无飘渺的假设，他要的是试验数据和合乎科学技术原理的解释。他对侥幸心理和对故障、差错的掩饰从来持严厉批评态度。对于故障或事故，他要求必须找到切实的原因，对未经科学试验所证明的故障、事故从不放过，宁可收兵回府。只有在地面上能确凿无误地多次复现故障，把问题彻底解决了以后，他才会同意重新进场试验。这就是他领导五院技术工作时提出的“把故障消灭在地面”的原则，这已成为航天部门约定俗成的传统和行为规范。

钱老是中国百年来爱国知识分子的杰出代表。他具有高度的民族自尊心、民族自信心和民族自豪感，在他的身上充分体现着中国知识分子的优秀品德。他生长在贫穷落后的旧中国，亲历过黑暗腐败的社会和帝国主义的侵略，深深地关切着祖国和人民的前途与命运，从年轻时代就立志学习现代科学技术，为祖国的强盛做出自己的贡献。正如他自己所说：“我在美国前三四年是学习，后十几年是工作，所有这一切都是在做准备，为了回到

祖国后能为人民做点事。因为我是中国人。”他1955年回到祖国后,立刻投身于新中国的科学技术和国防科技建设的事业中。清贫的物质生活,艰苦的工作条件,政治风浪的扰乱,都动摇不了他对祖国和人民的忠诚,改变不了他对科学事业的满腔热忱和忘我投入。他今天已经90岁高龄,仍在不懈地探索和思考科学技术发展和社会主义现代化建设事业。通过40多年的奋斗,他实践了自己一生的追求,把自己的全部智慧和精力献给了并继续奉献给他深深热爱的祖国和人民。面对巨大的荣誉,他回答说:“大家讲我钱学森如何如何,那都是千千万万人劳动的成果。我本人只是沧海一粟,渺小得很。真正伟大的是中国人民,是中国共产党,是中华人民共和国!”这些话体现了一位伟大科学家谦虚而博大的胸怀。

钱老在几十年的科学研究和工程实践中,一直以具有多领域的科学造诣、丰富的科学想象力、敏锐的科学直觉和勇于实践、勇于创新的精神而著称。他科学知识渊博,兴趣广泛,他的科学著作、科学思想涉及的领域很广,在很多科学技术领域中做出了开创性的贡献。他对未来科学方向的探索提出过很多创新性思想,对各学科中的中青年一代都产生了解放思想、鼓励创新的推动作用。

关于基础科学研究和工程技术之间的关系是过去20年中国科学界和工程技术界一直讨论的重大问题之一。正确制定对待这两个领域的方针政策,对中国当前和未来的建设与发展都具有重要的现实意义和长远意义。钱老一生从事技术科学的研究和应用,对于技术科学的作用、地位以及与社会的关系有着全面而深刻的认识。早在1948年,他在《技术和技术科学》(Engineering and Engineering Science)一文中就清楚地、辩证地阐明了两者的关系。他指出:“人们也许会说,在工业时代的开创时期,技术和科学研究就与工业发展有关,那么为什么今天把研究工作说得如此重要?这个问题的答案是,出于国内和国际竞争的需要,现代工业必须以越来越高的速度发展。做到如此高的发展速度,就必须大大强化研究工作,把基础科学的发现几乎马上用上去。也许,没有什么比把战时雷达和核能的发展作为例子更为突出的了。雷达技术和核能的成功开发为盟方取得第二次世界大战的胜利做出了重要贡献是公认的事实。短短数年,紧张的研究工作把基础物理学的发现,通过实用的工程,变成了战争武器的成功应用。这样,纯科学上的事实与工业应用间的距离现在很短了。换句话说,长头发纯科学家和短头发工程师的差别其实很小,为了使工业得到有成效的发展,他们间的密切合作是不可少的。”他认为从科学原理到工程技术之间有一个桥梁,那就是技术科学。他指出:“纯科学家与从事实用工作的工程师间密切合作的需要,产生了一个新的行业——技术研究家或技术科学家。他们成为纯粹科学和工程之间的桥梁。他们是将基础科学知识应用于工程问题的那些人……”

钱老50年前的这一论断,把科学研究细分为纯科学,即基础科学研究(如天文学、数学、粒子物理等)和技术科学研究两个方面,并阐明了它们与工程技术之间的关系。基础科学向技术科学研究提供新知识、新原理、新概念、新目标等系统的理论基础,而技术科学作为科学发现和产业发展之间的桥梁向工程技术源源不断地提供新途径、新方法、新技术

等基础技术,推动工程技术迅速进步,从而使后者充分发挥推动人类文明进步的发动机作用。为了达到这样的目的,技术科学家必须充分掌握自然科学的最新成果,深刻了解工程中存在的基本问题。因为工程师们面临的是多因素、复杂的实际问题,而技术科学家必须善于从这些实际问题中找到主要矛盾,创立有充分基础科学依据的、能被工程师用于设计的、有预测能力的定量理论。在科学研究中,技术科学家的目标是建立近似的实用理论,当发现基础科学的已有成果不够用时,也需要吸收和运用工程中经验性的规律和判断。所以技术科学在这一点上不同于基础科学;另一方面,技术科学又不同于工程技术,因为它的中心目的是研究和解决某类工程技术中带有普遍性的问题,而主要不是研究一个个具体的工程技术问题。他的深刻分析对今天我国科技政策的制定仍具有重要意义。

钱老早期在美国的主要研究领域是在应用力学、空气动力学和航空工程、喷气推进和航天技术、物理力学等领域,对这些领域的发展做出了开创性的贡献。在应用力学领域,他与冯·卡门合作对飞机金属薄壳结构非线性理论进行的研究解决了薄壳结构理论的重大难题;在空气动力学领域,他同冯·卡门和郭永怀等人合作,进行了一系列的研究,对发展高速航空器相关的空气流动理论做出了重要贡献;他从 1936 年起就开始从事喷气推进和火箭技术研究,在火箭和航天领域提出过很多重要概念和理论,成就斐然,被冯·卡门誉为“当时(1945 年)全美国优秀的一流火箭专家”,曾担任过加州理工学院古根海姆喷气推进中心主任。他是物理力学这一学科的创始者,在 1946 年就将稀薄气体的物理、化学和力学特性结合起来进行研究,1953 年正式提出物理力学的概念,用量子力学微观规律研究确定物质的宏观力学特性,取得了开创性的成就。

钱老受困于美国期间,1950 年开始研究控制论,于 1954 年在美国出版了《工程控制论》一书,轰动了全世界,迅速被译成德、俄、法、中等文出版。控制论学科的出现通常认为是从维纳(Norbert Wiener,1894~1964)的书《控制论——动物和机器中的控制和通讯》(“Cybernetics or Control and Communication in the Animal and Machine”,1948)开始的。该书发表后曾在哲学界引起轩然大波。当时苏联的哲学界称控制论是一种反动的伪科学,还有更严重的批评说,控制论是为帝国主义服务的战争工具。《工程控制论》一书系统地揭示了正在形成的控制论科学对自动化、航空、航天、计算机、电子通信等现代工程科学技术领域的深远意义和长远影响。它的问世使控制论这门新学科在全世界站住了脚根,逐步成为现代技术科学中的重要领域。半个世纪以来,由于微电子和计算机技术的迅速进步和普及,控制论和自动化技术极大地推动了技术科学的发展,广泛应用于社会生产、服务、消费的所有产业部门以及政治、军事和人们的生活之中。在制造业中,从计算机辅助设计与制造、数控机床,到柔性加工系统和计算机集成制造系统以及机器人的广泛进入生产线,成十、成百倍地提高了劳动生产率,丰富了产品的多样性,改善了人们的劳动条件。在今天的社会生活中,自动化装置无所不在,从通讯、金融、医疗,直到家庭主妇们天天使用的各种自动化家用电器。现代自动控制技术还极大地扩展了科学研究和探测的深度和广度,开拓了靠人力不能胜任的新的科学技术事业。半个世纪以来,人类的科学技术活动已经

深入到大洋和地层的深处，进入太空和宇宙，探索微观世界和人类生命的奥秘，都在极大的程度上得益于自动化控制和测量技术。控制论的概念、理论和方法对现代科学技术的各方面都产生了影响，近年来还被社会科学家们广泛应用于研究和解决复杂的经济、社会和政治问题。如果说人类社会文明的进步在19世纪是以实现了机械化代替体力劳动为标志，那么在20世纪则是实现了劳动生产的自动化和智能化，从而扩展和增强了人们的创新能力，极大地提高了劳动生产率，沉重的脑力劳动逐步地和部分地为智能自动化设备所代替，从而彻底改变了人类的生产和生活方式，提高了人们的生活质量。这是现代科学技术的丰功伟绩，而控制论科学家和工程师们为此做出了重要贡献。

《工程控制论》发表后立刻吸引了大批数学家、工程技术专家投身于控制论的研究，推动了20世纪五六十年代该学科发展的高潮。在这种形势下，原持批判态度的哲学家们也转而肯定控制论是一门“研究信息和控制一般规律的新兴科学”。1957年在巴黎成立国际自动控制联合会(IFAC)筹委会，中国是发起国之一，钱老当选为第一届理事会成员。1960年9月在莫斯科举行IFAC第一届世界代表大会，全世界控制论科学家云集于莫斯科大学礼堂，共庆控制论的胜利。他当时正受命领导建立中国航天科学事业，无暇顾此。各国与会者都为他不能出席这个盛会感到遗憾，只好相互吟诵《工程控制论》序言中的名句来表达对他的敬意：“建立这门技术科学，能赋予人们更宽阔、更缜密的眼光去观察老问题，为解决新问题开辟意想不到的新前景。”

在控制论科学理论和应用领域取得巨大成就的同时，信息技术和系统科学并驾齐驱，出现了相互渗透和融合的趋势，应用范围从工程领域延伸到工程管理系统，形成了“系统工程”的科学概念和方法。钱老由于所承担的工作性质和长期的工作经历而敏锐地注意到这种态势。早在世界上第一本关于系统工程的著作出现以前，他在加州理工学院喷气推进实验室(JPL)工作时就注意到运筹学的发展和意义并且是我国科技界公认的系统工程理论与应用方面的奠基人和倡导者。在他的主持下，20世纪50年代末在国防部第五研究院成立了作战运筹研究室。按他的倡议，1956年在中国科学院力学所成立了由许国志主持的运筹学研究组，后来扩大为研究室。1961年，在中国科学院数学所成立了由关肇直和我主持的控制论研究室。中国后来30多年发展的实践充分证明了这些措施的正确性和远见性。在他的直接领导下，国防部第五研究院建立了总体设计部，按系统工程的方法组织实施火箭、导弹、卫星等复杂系统的论证、研制、试验和交付工作。正如他后来总结的那样：系统工程是组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有“系统”都有普遍意义的科学方法。我国国防尖端技术的实践，已经证明了这一方法的科学性。

20世纪60年代以来，由于微电子和计算机技术迅猛发展和广泛普及，渗透到社会生产、生活和科学技术的每一角落，推动了与系统科学各相关学科的迅猛进步，各国很多科学家开始研究系统科学。80年代以来，对系统工程和系统科学的研究和应用在中国进入了一个新的高潮，除科学技术之外，在经济、军事、法律、教育等广泛领域的发展中都发挥

了重要作用。钱老密切注视着系统科学的发展，于1979年总结了系统科学的体系结构，阐明了它与马克思主义哲学和自然科学、社会科学的关系。他和他的合作者们广泛地研究了系统科学的结构、内涵、应用等方面的命题，指明了这门科学对中国现代化建设的重大现实和长远意义。近年来，让系统科学界最为兴奋的是，许多政治家开始广泛地应用系统科学的概念、理论方法和语言去处理社会问题。每当遇到复杂的问题时，政治家们常认为，这是一个复杂的系统工程问题，应该用系统的观点和方法进行分析和解决。系统工程一词广泛进入中国社会，钱老的推动起了重要作用。这一形势激励着系统科学家们振奋精神，坚持探索，迎接新的挑战。

20世纪70年代以来，计算机技术飞速进步，信息处理能力以空前的速度提高，人们开始借助计算机技术，从不同角度大规模地向研究复杂系统进军。在物理学家、生物学家、经济和社会学家的参与下，世界各国纷纷成立研究复杂系统的专门机构。钱学森是这一研究方向的带头人和倡导者。他对目前各国研究工作做了系统的评价，这对系统科学的发展，特别对研究复杂系统，诸如物理、化学、生物学以及生命科学的研究有重要的指导意义。自然界有很多复杂的巨系统，科学界至今不能理解和准确地描述它们，还没有建立系统的理论，缺乏有力的工具和手段来处理它，如社会系统、生态系统、生物进化系统，特别是人体系统。近几年，他和他的合作者们把基础理论和现代计算机技术中的人工智能相结合，提出了处理复杂巨系统的新方法论，把理论、经验和专家判断结合起来，从定性到定量综合集成(Meta - Synthesis)，以及“从定性到定量综合集成研讨厅体系”等。这是由信息采集、处理、存储、智能专家系统和科学知识库综合集成的，以人为主、人机结合的研究决策系统。综合集成方法为解决复杂巨系统的定量研究指出了一条可行的道路。他一直认为，在技术科学中，要大胆地把试验结果和经验数据与基础理论密切地结合起来去研究和解决新问题和复杂问题。如果自然科学现有知识不足，那么，就要努力去发现和建立新的理论、概念和方法。进入21世纪后，人类社会面临着众多的重要而复杂的大系统、巨系统问题需要研究和解决，如防止金融危机、控制人口增长、促进经济发展、保护生态环境系统、预测和控制气候变化等等。系统科学和控制论科学家和工程师们应当挺身而出，有所作为，做出自己的贡献。只要沿着数百年来自然科学家和工程技术专家所走过的辉煌道路开拓前进，系统科学必将会在新世纪取得突破性进展。

钱老说过：“我作为一名中国的科技工作者，活着的目的就是为人民服务。如果人民对我的一生所做过的工作表示满意的话，那才是最高的奖赏。”60多年来，他为人类科学技术事业的发展和中华民族的振兴做出了巨大的贡献，赢得了崇高的荣誉。祖国和人民深深地感谢他，对他的工作是非常满意的，为中国有这样的科学帅才而自豪。钱老是20世纪中国科技事业的巨擘、中国科技界的楷模和中华民族的英雄。我愿和大家一道，继续研究和学习他的科学思想、科学创新精神、忠于实践的科学态度，学习他对祖国、对人民、对中国共产党的无限热爱和忠诚，学习他坚持用马克思主义哲学的科学理论指导科研和技术工作，学习他伟大的奋斗和献身精神。只要我们和后来人能继承发扬这种精神，中国的

现代化就指日可待。

作者简介:宋健 1931年12月29日生于山东荣成。全国政协副主席,中国工程院院长。控制论专家。中国科学院院士,中国工程院院士。1958年在前苏联包曼高等工学院获工程师学位,1960年在莫斯科大学力学数学系毕业,同年包曼高等工学院研究生毕业,获副博士学位,后获博士学位。曾任国务委员兼国家科委主任。1960年前后,在最优控制系统理论方面获得一系列重要成果,后又从事分布参数控制理论的研究,建立了由偏微分方程描述的受控对象与常微分方程描述的控制器的模型,解决了这类系统的稳定性、点观测、点控制的理论问题。20世纪70年代修订和扩充了钱学森《工程控制论》一书,进一步发展了控制理论。1980年后,建立了"人口控制论"这门自然科学和社会科学相结合的新学科,对中国和发展中国家的人口控制问题具有重大现实意义。在几个型号导弹控制系统设计和反弹道导弹的方案设计及组织领导通信卫星的发射和定点过程中做出了重要贡献。

H. S. TSIEN – THE CALTECH YEARS

HIS INFLUENCE ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND EDUCATION

Frank E. Marble

California Institute of Technology
Pasadena

Science, Applied Science and Technology usually proceed by incremental advances; a new piece of research resolves questions raised by earlier work and, in all probability raises new questions which will challenge the skills of a subsequent generation. At rare times, however, a field is ripe for innovations that will so completely change its complexion that it scarcely will be recognizable to previous practitioners.

APPRENTICESHIP

Tsien's early work at Caltech came at such a time. It was the period when aeronautical practice had advanced to speeds necessitating that air be treated as a compressible gas and no longer as incompressible. This recognition spurred two identifiable paths of research. One was to understand the quantitative effects of compressibility on the behaviour of bodies in high speed subsonic flight. The other was to explore the challenges of supersonic flight and of the most promising means to achieve supersonic flight, rocket propulsion. With Theodore von Karman's vision and encouragement, Tsien pursued both paths. He made seminal contributions to the accurate calculation of subsonic flows and simultaneously to supersonic gasdynamics and to rocket propulsion. It is a tribute to his talent and maturity that each of these is treated in one of the four parts of his 1938 doctoral thesis and their publication immediately placed Tsien in the company of leading theoreticians.

When Tsien arrived at Caltech the gas turbine engine was still in an undeveloped state with the consequence that conventional flight was restricted to subsonic speeds. It was well known experimentally that the aerodynamic resistance to the motion of an object through air increased dramatically as its speed approached the velocity of sound. The contouring of bodies and wings to delay this "compressibility drag rise" was one of the aerodynamicists principal concerns and the analytical determination of such shapes was their great hope. Tsien and von Karman independently arrived at the same so-

lution to this problem and the "Karman – Tsien Compressibility Correction" was the most accurate technique available until computational methods became fast and economical.

For low speed flight the frictional resistance associated with the boundary layer of air flowing over the face was the most important effect of the very small viscosity of air. At high speeds, however, exceeding twice the speed of sound, the dissipative heating of the boundary layer developed very high temperatures in the immediate vicinity of the wall temperatures that could destroy the surface material. Tsien's calculations showed that for flight at six times the velocity of sound, an uncooled wall could reach a temperature of 8 times the outside air temperature!

It was well known that the incompressible flow over slender axially symmetrical bodies could, with good approximation, be represented by a distribution of sources and sinks along the symmetry axis. In 1932 von Karman and his student Norton B Moore showed that a corresponding representation was possible for slender sharp – nosed bodies moving supersonically, the difference being that the sources employed were acoustic sources. This elegant technique was restricted, however, to axially symmetric bodies thereby prohibiting the determination of lateral forces, or "lift" which are of great importance in the flight control of supersonic missiles, Tsien reasoned that adding an appropriate distribution of acoustic dipoles would permit determination of the flow field at small angles of attack. This was carried out successfully, again a part of his doctoral research, and published in October of 1938.

The final part of Tsien's thesis is an analysis of rocket propulsion by successive impulses and the motivation for such a study requires explanation. At this time controlled burning of high – energy solid propellants had not been perfected and the common mixtures of solid fuel and solid oxidizer powders were essentially explosives. So instead of a steadily burning source of high pressure, high temperature gas one could picture a sequence of small explosions each of which provided an impulsive thrust and acceleration to the rocket. The analysis demonstrated that for a reasonable number of impulses the performance compared favorably with that of an equivalent constant thrust rocket, concluding that propulsion by successive impulses is not without interest but the development of controlled burning solid propellants made such a technology unnecessary. However, the concept resurfaced a few years ago, suggested by the physicist Freeman Dyson, in the form of impulsive propulsion utilizing a sequence of miniature thermonuclear explosions!

With these four important pieces of research, Tsien completed his formal graduate work at Caltech and at this time he was appointed Research Fellow in von Karman's Guggenheim Aeronautical Laboratory of the California Institute of Technology.

Again with the encouragement of his mentor, Tsien turned his attention to the severe problems concerning the buckling of thin – shell structures. By this time it had become clear that light, efficient, and durable aircraft structures would untilize thin walled metal components and the design of

such structures became of great practical importance. But one of the glaring failures of the classical theory of shells was it's inability to calculate buckling loads which corresponded to those observed in manufactured structures. The classical analysis would often over – predict the observed buckling loads by a factor of three or four! Not only was this problem of great scientific challenge and technological importance, it was a problem that had fascinated von Karman since the days of his own "Inaugural Dissertation"!

The five significant papers on buckling that appeared through 1942 do not afford an adequate measure of the analysis that Tsien undertook during their creation. To grasp the time and effort that went into the search for a resolution of this issue one must peruse the volumes of Tsien's original working notes and calculations that are now collected in the Tsien Library and at the Institute of Mechanics.

The difficulty can be readily appreciated. An initially straight elastic column becomes unstable when a load, the Euler buckling load, is applied to its ends. It then jumps to a bowed, or buckled state and as further load is applied it deforms further. Therefore as a member of a loaded complex structure it would continue to carry at least its buckling load and would not transfer load to other members of the structure and lead to failure. A thin cylindrical shell, on the other hand, buckles in a very complex pattern, and more important, the load required to maintain this buckled state is considerably less than the load required, according to classical theory, to initiate buckling. This series of papers argues convincingly that the buckled state supporting a load far below the classical buckling load could be reached directly as the result of manufacturing inaccuracies, non – ideal loading on the structure and disturbances in the system of which the structure was a part.

I have dealt with these first six years is some detail because they comprised Tsien's "apprenticeship" to the world of the Applied Mechanics. He had developed those patterns that would characterize his future work. In each paper you will find a jewel, the essential reason for the existence of the work, but which you would not have discerned until after the analysis had been digested. Tsien was appointed Assistant Professor of Aeronautics in 1943.

ROCKET RESEARCH

Although the roots of rocket research and the development at Caltech are complex, one significant event is clear. In the spring of 1935 William Bollay, one of Karman's research students, presented a review of the work by Dr. Eugen Sänger of Vienna concerning airplane performance using rocket propulsion. Bollay's lectures, in turn, stimulated the interest of Frank J. Malina, another student, who hoped to write his doctoral thesis on the subject of rocket propulsion. Quite independently two "amateur" rocket enthusiasts were experimenting at their Pasadena home with rocket pro-

pellants. One, John W. Parsons had some background in chemistry; the other, Edward S. Forman, was a skilled craftsman. Faced with lack of success, Parsons and Forman came to Caltech seeking advice which eventually led them to Malina. In 1936 the three appeared in Karman's office asking approval to pursue their experiments in the Aeronautics Laboratories. Karman must have been impressed by these earnest young men because he permitted them use of part of the aeronautics shop during non-working hours! With Karman's approval of research aimed at the development of a sounding rocket, the group attracted other students, Tsien among them. But Karman's approval included no financial support; funding of the experiments was entirely private.

A central problem was to develop a solid propellant with acceptable structural properties, that would support a surface burning rate that was both very rapid and controllable. Tsien and Malina performed some of the first analyses of the relationships between propellant burning rate, chamber size and pressure, and the thrust level. But propellant development was an empirical art and the danger of the experiments was so great and the results so uncertain that the rocket experiments were moved outside the Aeronautics building to a spot adjacent to the laboratory and eventually to a remote location in the Arroyo Seco seven miles from the Caltech campus. This group of bold enthusiasts, initially christened the Suicide Club, was the nucleus that eventually grew to be the Jet Propulsions Laboratory.

In May of 1938 with growing concern about the military developments in Europe, the U.S. Army Air Corps showed interest in rocket assisted take-off to allow large aircraft to fly from small fields. An agreement with Caltech for research leading to such a development was reached in July 1939 and the resulting contract became GALCIT Project NO.1. A major issue still was to develop a chemically and physically reliable solid propellant that had the proper relationship between pressure and burning rate to assure stable performance throughout its firing time. Bolstered by analytical studies, experiments and developments in propellant manufacture, a suitable rocket was ready in the summer of 1941, In August of that year the first Jet Assisted Take Off of a small single engine airplane was successfully performed and the JATO motor was born! Subsequent manufacture of these JATO units led to formation of the Aerojet Corporation.

THE WAR YEARS

With the entry of the United States into World War II many university faculty were drawn into military or industrial work. Karman's services were much in demand and through his activities many of his colleagues, including Tsien, became involved also. In September 1944 General Henry H, "Hap" Arnold told Karman that the Army Air Force urgently needed advice from the finest collection of scientists that could be assembled and that he wanted Karman to direct it. As a result Karman went to Washington in December organize what was initially called the Army Air Force Scientific Advisory

Group. Tsien was appointed to this Scientific Advisory Group in January 1945. General Arnold made it clear to the group that he expected a report that would outline a course of research and development to be followed over the next ten or more years to insure the United States the mastery of military air power.

With the war in Europe nearing its end Arnold suggested that Karman and a few of his group undertake a technical mission to the aeronautical centers of Germany. Karman's group, consisting of H. L. Dryden, Frank Wattendorf, George Schairer and H. S. Tsien, started in late April 1945 following the occupation Army as they moved through Germany. There Tsien was able to inspect their work on high speed aerodynamics, their developments of the pulse - jet and turbojet engines, and their rocket and missile technology. Their findings confirmed the advantages of utilizing swept wings to delay the drag rise at high Mach number. This result was quickly relayed to the Boeing Airplane Company and stimulated a complete redesign of the B - 47 aircraft.

The over - riding requirement for the production of current military equipment had slowed the introduction of new and revolutionary ideas and the insight gained from this mission confirmed Arnold's need of a long term plan for modernization of the U. S. Airforce. To this end, the Air Force Scientific Advisory Group, renamed the Scientific Advisory Board, undertook an intensive study and the final report, well known as "Toward New Horizon", became the important reference document for the following years. Tsien wrote sections on High Speed Aerodynamics and Propulsion. It contained detailed new analyses of Pulse - jets, Ramjets, a variety of Gas Turbine Cycles, Rockets and Long Range Missiles.

Earlier it had become clear that this field of Jet Propulsion required an educational program substantially different than what could be accommodated within existing academic curricula. In a move to strengthen the technical knowledge of the military, the Air Technical Service Command of the Army Air Force requested that Caltech provide a graduate course in rocket and jet propulsion to a group of officers assigned to the institute for the academic year 1943 - 1944. The course was planned by von Karman with members of GALCIT and the Jet Propulsion Laboratory providing lectures at the campus and laboratory instruction at JPL. When the course was repeated the following year, the lecture material and problems were organized and edited by Tsien into a comprehensive reference text covering thoroughly the basic principles of jet propulsion and the performance of jet - propelled vehicles. This giant book, "Jet Propulsion" was an invaluable reference for more than ten years in spite of the great advances that were being made in the subject.

Tsien was able to find time for research and his interest still centered on finding optimum wing and body geometries to suppress the drag increase at high speeds caused by the appearance of shock waves. He had devised a technique, growing out of his work of 1939, the basic ideas of which appeared in 1944. The reduction of the technique to a practical calculation was completed in 1945 by

Tsien and his student Y. H. Kuo.

It was clear to Tsien with the physical limitations that existed for propulsion using energy released by chemical reaction, nuclear energy was the logical next step. Tsien points out, in his 1945 paper Atomic Energy, that aeronautical applications of the emerging field of nuclear power are the most likely because fuel weight per unit of energy is of prime importance in flight whereas it is the fuel cost that determines its utility in terrestrial applications. This paper provides basic physical principles and quantitative information for engineering analysis of aeronautical applications of nuclear energy. Specific applications of nuclear energy to jet propulsion systems were discussed in detail in Seminars delivered at MIT in 1947.

THE DANIEL AND FLORENCE GUGGENHEIM JET PROPULSION CENTER

At the beginning of the summer of 1946 Tsien accepted a professorship at the Massachusetts Institute of Technology but other events would quickly draw him back to Caltech, During the summer of 1948 the Daniel and Florence Guggenheim Foundation proposed to stimulate the development of the science and technology of jet propulsion by establishing centers of research and education, one at the California Institute of Technology and one at Princeton University. They would be known as the Daniel and Florence Guggenheim Jet Propulsion Centers; a Robert H. Goddard Professorship would be established at each institution and each would appoint an outstanding expert to this chair who would direct the research and educational program of the center. I'm sure it was with genuine satisfaction that Tsien received an offer of the Goddard Professorship from both institutions! As Dr. DuBridge, president of Caltech says in his letter of September 29, 1948, "Needless to say, both Princeton and Caltech thought of you at once as the logical person to head up such a center." He goes on to urge Tsien to accept the Caltech offer; Tsien's letter of acceptance is dated October 7, 1948 and on November 19 the official agreement was signed.

At this time I had decided to leave Caltech, possibly for Cornell. In late February 1949 I so informed Dr. Lindvall, Chairman of the Division of Engineering. After some hesitation he revealed the closely guarded secret that Tsien was returning to Caltech and that it was Tsien's hope that I would stay and work with him on the new Center. Nothing could have pleased me more and I wrote Tsien of my enthusiasm for the opportunity. In his reply he wrote "My own dream is nothing short of going to the moon." That was my introduction to Tsien's penchant for "thinking big" and squandering little time on small issues!

By August Tsien and his family had settled in Pasadena and he was busy with the organization and planning that would allow the Center to be functioning when the academic year began. The course

of instruction in Jet Propulsion that Tsien had been instrumental in organizing in 1943 was still being offered and naturally he built on that foundation. But a much more extensive course structure and research direction was needed to lead to a doctoral degree. Here Tsien made one of his very wise decisions; the Jet Propulsion Center would accept students pursuing degrees in Aeronautics, Mechanical Engineering or Applied Mechanics, provide their instruction and guide their research. The final degree, however, would be granted in the area in which they were registered. This assured flexibility for both the students and the faculty.

One of the substantial advantages of the Guggenheim grant was that it provided funds for fellowships to support graduate students. These "Guggenheim Fellows" were selected by the Goddard Professor and were the particular responsibility of the Center regardless of their registration affiliation. Those appointed Guggenheim Fellows had been judged exceptional and, usually, they developed into superior research workers in industry or in academia. Due to Tsien's meticulous planning and guidance the Center richly fulfilled Harry Guggenheim's aims.

This was a time in United States history when a few zealous but misguided politicians bred hysteria and distrust in many otherwise reasonable citizens. As a consequence of this aberration many innocent people were seriously damaged, H. S. Tsien among them. I have no intention of elaborating on these events which have been described fully and accurately by Milton Viorst and from von Karman's personal viewpoint in his autobiography. Rather I wish to emphasize the remarkable resilience with which Tsien reacted to this crushing blow in the early summer of 1950. By the end of that year his scientific productivity had returned to a prodigious level which continued until he and his family returned to China in the fall of 1955.

Two broad themes occupied much of his attention for the next four years. One was the solution of problems posed by the extreme conditions of temperature, pressure and heating rate encountered by jet propulsion systems and the vehicles associated with them. The second was the necessity of applying sophisticated control methods in the development of rocket propelled missile and satellites.

Two tools were brought to bear on the first of these; the technique of similarity analysis, which he and von Karman had employed previously in aerodynamic analysis, and the new field of physical Mechanics introduced and developed by Tsien for this purpose. Similarity analysis reduces one physical problem, which because of flight speed, temperature, time scale, or geometry may be difficult or impossible to treat experimentally, to a "similar" problem which is simpler experimentally and from which the results necessary to solve the original problem may be obtained. One of these, a collaborative work with C. M. Cheng, reduced the stress history of a thin cylinder, rapidly heated to temperatures where the elastic properties were changing, such as the casing of a solid, propellant rocket, to the stress history of a modified cylinder at constant temperature and under different conditions of loading but which could readily be treated either analytically or experimentally. In a later paper Tsien ap-

plied the similar discipline to the rapidly heated wings of a supersonic airplane or the fins of a missile.

The design of jet propulsion systems often requires knowledge of the properties of gas of unusual composition at extreme temperatures and the properties of exotic liquid propellants at unusual states. These properties are frequently not known or more often the desired states were outside experimental capability. To attack such issues Tsien developed the principles of statistical mechanics into the field he named Physical Mechanics. In his ground – breaking paper of 1952 he points out that while the scientist utilizes statistical mechanics to confirm the adequacy of the molecular models used, the engineer must reverse the process and utilize statistical mechanics to obtain bulk properties of engineering materials from known, reliable molecular models. In two papers, 1952 and 1954, he demonstrated the application of this new discipline to liquid properties and to gases at very high temperatures, Tsien developed a lecture in Physical Mechanics which he offered regularly through 1955 along with an excellent set of notes, copies of which are still used as reference.

Even before the Jet Propulsion Center was formed, Tsien wished to introduce elements of control theory and their application to missile control and guidance into the curriculum. The opportunity came in 1951 – 1952 when much of his former lecturing duties had been assumed by members of his staff, in addiction there appeared a relevant article by his old colleague William Bollay that covered some of the background material that the students would need. One important aspect of his course of lectures that was in contrast with others was the absence of "implementation", the design of system components. The result, "Engineering Cybernetics" is an engineering science rather than an engineering practice. Over the next three years Tsien pursued his own research and guided that of his students in this growing area. The stability of liquid propellant rockets had always been perplexing and difficult to deal with analytically because the cycle of self – excitation involved a combustion time delay. In 1952 Tsien proposed a novel solution of the problem which avoided the need for detailed knowledge of the time delay mechanism.

One object of Tsien's interest in control theory was to devise a control to seek the optimum operating point for a complex system and then to hold this point during further operation. Such devices had been constructed by his MIT colleagues for the optimalizing control of an internal combustion engine and for process control. In 1954, together with his student Serengecti, Tsien developed the theory for the optimalizing control of a fairly general system and gave design principles for minimizing the "hunting" loss.

In the academic year 1954 – 1955 Kuo Yung – Huai Professor at Comell University and Tsien's former student and colleague, came to Caltech for a sabbatical year. He had recently completed an important extension of the theory of laminar boundary layer on a flat plate and in doing so introduced a new concept in perturbation analysis. As Kuo was extending this to the problem of the hypersonic

boundary layer, Tsien recognized Kuo's work as an extension of the perturbation analysis that Poincare introduced into orbital mechanics and the more recent work of Lighthill on the extension of the range of validity of perturbation solutions. The result is the extensive review establishing the potentialities of the unified method which Tsien called the P(oincare) L(ighthill) K(uo)method. This article, which preserved Kuo's contribution in appropriate perspective, appeared just before he returned to China. Tsien's last work completed in the United States was his study of Thermonuclear Power Plants which for the first time estimated the enormous size such an installation would require.

CONCLUDING REMARKS

The importance of Tsien's contributions to aeronautics and astronautics in the period 1936 - 1955, from his student years until his return to China, is universally recognized. Many of these works have become classics in the literature of science and technology. It was a great satisfaction to his friends and fellow workers that these documents have been assembled in the splendid volume, The Collected Works of H. S. Tsien, 1938 - 1956. This book will serve as a constant reminder to colleagues and students of the engineering sciences of not only the deep insight they contribute, but the fact that he produced timely solutions to serious problems that were facing practicing engineers.

On the other hand, except in the memories of those few individuals who had the good fortune to work with Tsien, little is known and even less is recorded of the unusual concentration, intensity and devotion with which he pursued his work. But Tsien was such a meticulous craftsman that much of his method may be gleaned from the original notes, analysis and manuscripts that remained after each document was complete. For scholars and students to gain some insight into this creative process is as least as important as the papers themselves - because it is timeless! I was delighted to learn that a selection of these original notes has been published in a book titled Manuscripts of H. S. Tsien, 1938 - 1955.

In this brief article I have revisited selected works of Tsien Hsue - Shen in the context of circumstances and events that accompanied and shaped them. Clearly this is important because it is the role of the engineering scientist to respond to and to shape these events. It is my hope that knowledge of the historic setting in which Tsien worked will complement the collections of papers and manuscripts and allow a deeper appreciation of them.

REFERENCES

1 Tsien HsueShen. Problems in the Motion of Compressible Fluids and Reaction Propulsion. PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1938

2 Tsien HsueShen. Two Dimensional Subsonic Flow of Compressible Fluids. J. A. S., Vol. 6, No. 10, August 1939, pp 399 ~ 207

3 von Karman Th., Tsien HsueShen. Boundary Layer in Compressible Fluids. J. A. S., Vol. 5, No. 12, October 1938, pp 227 ~ 232

4 Tsien HsueShen. Supersonic Flow over an Inclined Body of Revolution. J. A. S., Vol. 5, No. 12, October 1938, pp 480 ~ 483

5 Tsien HsueShen, Malina Frank J.. Flight Analysis of a Sounding Rocket with Special Reference to Propulsion by Successive Impulses. J. A. S. Vol. 6, No. 2, December 1938, pp 50 ~ 58

6 von Karman Th.. Untersuchungen uber Knickfestigkeit. Forschungsarbeiten No. 81, Berlin, 1910

7 von Karman Th., Tsien HsueShen. The Buckling of Spherical Shells by External Pressure. J. A. S., Vol. 7, No. 2, December 1939, pp 43 ~ 50

8 von Karman Th., Durn Louis G., Tsien HsueShen. The Influence of Curvature on the Buckling Characteristics of Structures. J. A. S., Vol. 7, No. 7, May 1940, pp 276 ~ 289

9 von Karman Th., Tsien HsueShen. The Buckling of Thin Cylindrical Shells under Axial Compression. J. A. S., Vol. 8, No. 8, June 1941, pp 303 ~ 312

10 Tsien, HsueShen. Buckling of a Column With Non – Linear Lateral Supports. J. A. S., Vol. 9, No. 4, February 1942, pp 119 ~ 132

11 Tsien HsueShen. A Theory for the Buckling of Thin Shells. J. A. S., Vol. 9, No. 10, August, 1942, pp 373 ~ 384

12 Tsien HsueShen. Editor, Jet Propulsion. A Reference Text Prepared by the staffs of the Guggenheim Aeronautical Laboratory and the Jet Propulsion Laboratory of the California Institute of Technology, Air Materiel Command, 1946

13 Tsien HsueShen. The Limiting Line in Mixed Subsonic and Supersonic Flow of Compressible Fluids. NACA Technical Note No. 961, November 1944

14 Tsien HsueShen, Kuo YungHuai. Two – Dimensional Irrotational Mixed Subsonic and Supersonic Flow of a Compressible Fluid and The Upper Critical Mach Number. NACA Technical Note No. 995, May 1946

15 Tsien HsueShen. Atomic Energy. J. A. S., Vol. 13, No. 4, April 1946, pp 171 ~ 180

16 Tsien HsueShen. Rockets and Other Thermal Jets Using Nuclear Energy. Seminars No. LIV and LV, May 13 and 15, 1947, pp 1 ~ 25

17 Tsien HsueShen. Instruction and Research at the Daniel and Florence Guggenheim Jet Propulsion Center. Journal of the American Rocket Society, No. 81, June 1950

18 Viorst Milton. The Bitter Tea of Dr. Tsien. Esquire Magazine, September 17, 1969, pp 125 ~ 170

19 von Karman Th. (with Lee Edson). The Wind and Beyond. Little Brown and Co., Boston, 1967, pp 308 ~ 315

20 Tsien HsueShen. Similarity Laws of Hypersonic Flows. Journal of Mathematics and Physics, Vol. 25, 1946, pp 247 ~ 251

21 Tsien HsueShen , Cheng Che – Min. A Similarity Law for Stress in Rapidly Heated Thin – Walled Cylinders. Journal of the American Rocket Society, Vol. 22, pp 144 ~ 149

22 Tsien HsueShen. Similarity Laws for Stressing Heated Wings. J. A. S., Vol. 20, No.1, 1953, pp1 ~ 11

23 Tsien HsueShen. Physical Mechanics, A New Field of Engineering Science. Journal of the American Rocket

Society, Vol. 23, 1953, pp 14 ~ 16
24 Tsien HsueShen. The Properties of Pure Liquids. Journal of the American Rocket Society, Vol. 23, 1953, pp 17 ~ 24
25 Tsien HsueShen. Thermodynamic Properties of Gas at High Temperatures and Pressures. Jet Propulsion, Vol. 25, 1955, pp 471 ~ 473
26 Bollay W.. Aerodynamic Stability and Automatic Control. J. A. S., Vol. 18, No. 9, July 1951, pp 569 ~ 623
27 Tsien HsueShen. Engineering Cybernetics. McGraw – Hill Book Company, 1954
28 Tsien HsueShen. Servo Stabilization of Combustion in Rocket Motors. Journal of the American Rocket Society, Vol. 22, 1952, pp 256 ~ 262
29 Tsien HsueShen, Serdengecti Sedat. Analysis of Peak – Holding Optimalizing Control. J. A. S., Vol. 22, No. 10, August 1955, pp 561 ~ 725
30 KuoYung Huai. On the flow of an Incompressible Fluid Past a Flat Plate at Moderate Reynolds Number. Journal of Mathematical Physics, Vol. 32, 1955, p 85
31 Poincaré H. Les Mathodes Nouvelles de la Mechanique Celeste. Vol. 1, Ch. Ⅲ, Paris, 1892
32 Lighthill M. J. A Technique for Rendering Approximate Solution to Physical Problems Uniformly Valid. Phil. Mag., Vol. 40, 1949, p 1179
33 Tsien HsueShen. The Poincare – Lighthill – Kuo Method, Advances in Applied Mechanics, Vol. 4, Academic Press, 1955, pp 281 ~ 349
34 Tsien HsueShen. Thermonuclear Power Plants. Jet Propulsion, Vol. 26, 1956, pp 559 ~ 564
35 Wang Shouyun. The Collected Works of H. S. Tsien, 1938 – 1956. Science Press, Beijing, 1991

钱学森在加州理工学院

——他对科学、技术和教育的影响

富兰克 E.马勃

(陈允明、郑哲敏译)

科学、应用科学和技术的发展通常是循序渐进的:一项研究解决了以往提出的问题,同时又往往提出新的问题来挑战下一代。然而,偶尔也有这种情况,即某个研究领域内革新的条件已经成熟,从而彻底改变该领域的面貌,令人难以辨认。

一、求学时代

钱学森在加州理工学院的早期工作恰逢这样的时候。航空工业对飞行速度要求之高,使人们必须把空气当做可以压缩的气体,以致再也不能把它看成不可压缩的了。这种

认识开辟了两个新的研究方向:一个是研究高亚声速飞行时,压缩性对飞行器性能的定量影响;另一个是接受超声速飞行的挑战,探索最富前途的实现这种飞行的方法——火箭推进。在冯·卡门的远见和他的鼓励下,钱学森在两方面都同时做了研究。在亚声速流场的精确计算以及超声速空气动力学和火箭推进方面,他都做出了原创性的贡献。钱学森1938年博士论文的四个部分,分别研究了上述每一个方面的问题,充分显示了他的才能和成熟。论文的发表立刻使他跻身顶尖理论家的行列。

在他到达加州理工学院的时候,燃气轮机还处于待发展阶段,常规飞行限于亚声速。实验上已经知道,当飞行速度趋近于声速时,物体的气动阻力激剧增加。空气动力学的主要问题之一就是如何改进机身和机翼的外形以推迟“压缩性阻力上升”,人们最希望能解析地确定这种外形。钱学森和冯·卡门相互独立地得到同一解答,在快速、经济的数值计算方法出现之前,“卡门—钱可压缩性修正”一直是最准确的计算公式。

空气黏性系数很小,低速飞行时,它的主要效应表现为边界层的摩擦阻力。然而,高速飞行时(两倍声速以上),边界层的耗散热在壁面附近产生的高温可能损坏壁面材料。钱学森的计算表明,六倍声速飞行时,不经冷却的壁面温度可能达到外界空气温度的八倍!

众所周知,绕轴对称细长体的不可压缩流可以很好地用沿对称轴上分布的源汇来近似表示。冯·卡门及其学生 Norton B. Moore 于 1932 年证明,超声速飞行的尖头细长体也有类似的近似表示,区别仅仅在于用的是声源。但这个漂亮的技巧仅限于轴对称情况,因而无法确定横向力,即对超声速导弹的飞行控制至关重要的升力。钱学森提出,添加适当分布的声偶极子将使确定小攻角细长体的流场成为可能。这项研究作为博士论文的一部分,也顺利完成,并于 1938 年 10 月发表。

钱学森博士论文的最后部分是分析序列脉冲作用下的火箭推进。需要解释一下这项研究的动机。当时高能固体推进剂的可控燃烧尚不完善,固体燃料和固体氧化剂粉末的混合物基本上都是炸药。所以,可以设想以一系列的小爆炸代替高压、高温气体的稳定燃烧,每次爆炸提供一个脉冲推力来加速火箭。分析表明,只要脉冲的数目得当,就可以获得与恒定推力火箭可比的性能。于是可以说,以多次脉冲方式推进不是没有好处的。只不过后来由于可控燃烧固体推进剂的发展,这种技术变得没有必要了。然而,几年前这个概念又被提了出来,物理学家 Freeman Dyson 建议利用一系列微热核爆炸实现脉冲式推进!

钱学森以这四项重要研究成果结束了他加州理工学院的研究生生涯,并且被加州理工学院古根海姆航空实验室(GALCIT)聘为研究员(Research Fellow)。

还是在导师的鼓励下,钱学森把兴趣转向了薄壳发生严重屈曲的问题。当时已经很清楚,轻巧、高效而耐用的飞机结构必然要采用薄壁金属部件,因而这类结构的设计具有极其重要的实际意义。然而壳体的经典理论在这方面却全然无能为力。它经常过高估计临界屈曲载荷达三四倍之多!这个问题不仅具有重大的理论价值和实际意义,而且它还是冯·卡门本人发表“就职论文”(Inaugural Dissertation)以来一直困惑着他的问题!

到1942年,钱学森发表了5篇关于屈曲问题的重要论文。单从文章本身无法充分领会钱学森花在这项创造性研究上的精力和时间。想要领会这一点就必需阅读钱学森的原始笔记和计算,它们现已被收藏在力学所和钱学森图书馆。

这个问题的难度不难理解。一个初始平直的弹性柱体,当其两端受到的载荷达到欧拉屈曲载荷时,就会变得不稳定,突然成为弓形,即进入了屈曲状态。载荷继续增加,它的变形就随着增加。因此,作为承载结构的一个部件,至少将继续承担其屈曲载荷,而不会将载荷转移给其他部件而导致整个结构的破坏。另一方面,柱形薄壳的屈曲形态很复杂。尤其重要的是,保持屈曲状态所需的载荷要比经典理论给出的初始临界屈曲载荷小得多。以上一系列论文令人信服地表明,由于制造中的误差、加载的非理想性以及以该结构为部件的整个系统的扰动,可以直接达到承担载荷远低于经典屈曲载荷的屈曲状态。

我把头6年叙述得比较仔细,因为这是钱学森入门应用力学世界的"学徒"时期。这时他形成了自己特有的风格,成为他以后各项工作的标志。人们从每篇论文中都能发现"珠宝",这就是这些著作能够面世的根本原因。不过,这一点只有当你深入消化他的分析之后才能发现。1943年他被聘为副教授。

二、火箭研究

虽然,加州理工学院的火箭研究和发展的起源很曲折,但有件重要的事情是清楚的。1935年春天,William Bollay,冯·卡门的一位研究生,就维也纳 Eugen Sänger 博士关于用火箭推进的飞机性能所进行的研究做了文献报告。他的报告引起了另一位研究生 Frank Malina 的兴趣,后者希望选择火箭推进作为自己博士论文的题目。此外还有两位"业余"火箭迷,独立地在各自位于 Pasadena 的家中试验火箭推进剂。其中 John Parson 有些化学方面的背景,另一位 Edward Forman 长于动手。屡屡失败的他们来到加州理工学院寻求帮助,最后找到了 Malina。1936年三人出现在冯·卡门的办公室,请求批准他们在航空实验室做实验。冯·卡门肯定被年轻人的赤诚所深深打动,因为他竟允许他们在下班时间利用实验室的部分车间!有了冯·卡门的批准,这项发展探空火箭的研究吸引了更多的研究生,其中就包括钱学森。但是,冯·卡门的允诺并不包括财政支持,因此实验资金完全来自私人。

中心问题是发展一种具有可接受的结构性能的固体推进剂,以实现很高而且可以控制的表面燃烧速率。钱学森和 Malina 对推进剂燃烧速率、燃烧室尺寸、燃烧室压力和推力之间的关系做了最初的分析。但是推进剂的发展是以经验为主的一种技艺,实验很危险,而结果又没有把握。因此实验被移到航空楼外附近的空地上,最后迁往加州理工学院校园7英里外的边远山沟 Arroyo Seco。这群最初被戏称为"自杀俱乐部"的敢闯而热心的年轻人,后来成为喷气推进实验室(JPL)的核心力量。

1938年5月,出于对欧洲军事事态发展日益增长的关切,美国陆军航空兵对利用火箭助推让大飞机在小机场起飞表现出兴趣,遂于1939年6月与加州理工学院订立了开展该

项研究的协议,这个合同变成“GALCIT Project No.1”,即“加州理工学院古根海姆航空实验室一号计划”。主要的问题仍然是发展一种化学和物理上可靠的固体推进剂,使其具有恰当的压力与燃速关系,以确保整个燃烧阶段的稳定性。基于理论分析、实验研究以及推进剂制造方面的进展,一个合适的火箭终于在1941年夏天问世了。当年8月第一架靠喷气助推起飞的单引擎小飞机成功起飞,JATO(喷气助推起飞)发动机终于诞生了!这些发动机的后续生产,还导致了Aerojet公司的成立。

三、战争年月

随着美国参与第二次世界大战,许多大学的教职员卷入了军事或工业活动。需要冯·卡门参与的要求变得很迫切。由于他的参与,许多同事,包括钱学森,也参加了进来。1944年9月,Henry H.(Hap) Arnold将军告诉冯·卡门,迫切需要把所能找到的最好的科学家召集起来,为美国空军航空兵提供咨询意见,而且要冯·卡门来领导这个小组。因此冯·卡门于12月来到华盛顿,组成最初被称为空军航空兵科学顾问小组的组织。1945年1月钱学森被聘为小组成员。Arnold将军明确告诉小组他希望得到一份报告,勾画未来10年或更长的时间里研究与发展的道路,以确保美国掌握空中军事力量的优势。

随着欧洲战事趋向尾声,Arnold将军建议冯·卡门和几个小组成员到德国的各航空中心去执行一项技术任务。以冯·卡门为首的小组包括H. Dryden、Frank Wattenedorf、George Schairer和钱学森。随着盟军在德国的推进,他们于1945年4月晚些时候开始工作。于是钱学森得以考察德国的高速空气动力学研究、脉冲喷气发动机和涡轮喷气发动机的发展以及火箭、导弹技术。他们的发现证实了后掠机翼可以推迟高马赫数下的阻力上升,该结果迅速传到波音飞机公司,导致B-47飞机的全部重新设计。

对当时军事设备生产的压倒一切的需求,减缓了新的、革命性思想和观点的引入。执行这次任务的所见所闻证实了Arnold将军的想法,即需要有一个美国空军现代化的长期规划。为了这个目的,空军科学顾问小组,这时更名为科学顾问委员会,负责进行了深入集中的研究,所写出的最终报告——著名的《迈向新高度》(Toward New Horizon),成为后续年代里重要的参考文件。钱学森撰写了有关高速空气动力学和推进的章节,其中包含对脉冲喷气发动机、冲压式喷气发动机、各种燃气涡轮循环、火箭和远程导弹所作的新的、详细的分析。

早些时候已经意识到,由于差别过大,喷气推进这个领域需要的教育计划难以纳入已有的课程体系。为了强化军队的技术知识,美国陆军航空兵的空军技术后勤司令部要求加州理工学院,为1943~1944学年派往该学院的一批军官提供火箭与喷气推进方面的研究生课程。冯·卡门和他加州理工学院古根海姆航空实验室和喷气推进实验室的同事们制定了课程,讲课在校园,实验课安排在喷气推进实验室。第二年再次组织研究生教育时,钱学森组织、编辑了内容丰富的教材,全面地论述喷气推进的基本原理和喷气推进飞

行器的性能。《喷气推进》这本巨著,成为以后十几年间不可或缺的参考书,尽管在此期间该领域有重大进展。

钱学森还挤出时间从事研究,其兴趣仍集中于寻找机翼和机身的最佳形状,以抑制高速飞行出现激波时阻力的增加。基于自己1939年的工作,他想出了一个办法,其基本思想发表于1944年。将这个办法变成实用的计算,则是由他及他的学生郭永怀[1]于1945年完成的。

他很清楚,利用化学能来推进受到物质条件的种种限制,核能自然是合乎逻辑的下一步。在1945年题为《原子能》的论文中,他指出,将正在崛起的核能应用于航空是最有可能的,因为单位能量的燃料重量对于飞行来说是至关重要的,而燃料的成本对大气中飞行的用途有决定性影响。该文给出了在航空上应用核能和进行工程分析的物理原则和量化信息。1947年在麻省理工学院的研讨会上,他详细地讨论了核能在喷气推进系统方面的具体应用。

四、Daniel & Florence 古根海姆喷气推进中心

1946年初,钱学森接受了麻省理工学院的邀请担任副教授。但其他事态的发展又很快将他吸引回加州理工学院。1948年夏,Daniel & Florence 古根海姆基金会建议,为促进喷气推进技术的发展,在加州理工学院和普林斯顿大学分别建立一个研究和教育中心,叫做 Daniel & Florence 古根海姆喷气推进中心。每个中心都设立一个 R. H. Goddard 讲座教授的职位,聘请杰出科学家担任此职并指导该中心的研究和教育工作。我想,钱学森一定感到由衷地高兴,能从两个学校都收到担任讲座教授的邀请!正如加州理工学院校长 DuBridge 博士在邀请信中所说:"不用说,普林斯顿大学和加州理工学院都立刻想到你是领导这个中心的合适人选。"他进而敦促钱学森接受加州理工学院的邀请。钱学森于1948年10月7日回信接受邀请,11月19日签署了正式协议。

当时我正想离开加州理工学院,准备去康奈尔大学。1949年2月底我把我的打算告知工学院院长 Lindvall 博士。犹豫一下之后,他向我透露了钱学森即将回加州理工学院这个严加保守的秘密,而且说,钱学森希望我能留下与他一起在中心工作。没有什么能使我更为高兴的了,于是我立刻给钱学森写信,说我多么高兴能有这个机会。他在回信中说:"我的梦想就是飞往月球"。这向我第一次显示了钱学森不在小事上浪费时间,只关注大事的一贯风格。

8月,钱学森及其家人在 Pasadena 安了家,他立即投入组织和计划工作,设法使中心在学年一开始就能运转起来。他于1943年组织的喷气推进教程仍在讲授,这自然是新教学计划的基础。但博士学位要求范围广泛得多的课程结构和研究方向。为此,钱学森做出了一个明智的决定:喷气推进中心接受攻读航空、机械工程或应用力学学位的学生,提供

---

[1] 郭永怀的导师是 von Karman,钱学森时任 von Karman 的助手并任教。——译者注

课程教学并指导研究。最后的学位则由他们原注册的科系授予。这就保证了教师和学生双方的灵活性。

古根海姆赠款的一个重要优点是由它向研究生提供奖学金。这些古根海姆奖学金获得者由 Goddard 讲座教授挑选,中心向他们支付奖学金而不管他们原来在哪个系注册。这些古根海姆奖学金获得者人人能力杰出,而且大多发展成为工业或学术界的优秀研究人员。由于钱学森的精心计划和指导,中心圆满地达到了 Harry Guggenhaim(古根海姆)的目的。

当时美国处于这样一个时期,少数激烈且方向错误的政客在许多原本理性的公民中挑起歇斯底里和不信任,使许多无辜的人受到严重的伤害,钱学森就是其中一员。这个事件已在 Milton Viorst 的文章以及冯·卡门的自传中得到详细而准确的叙述,我对此无意多说。我想强调的是,钱学森对 1950 年初夏这次严重打击所表现的超常的坚韧性。当年年底,他的科学创造力已经恢复到惊人的水平,并一直持续到 1955 年秋天他们全家返回中国。

之后 4 年,他的注意力集中在两个广阔的主题上。一个是如何解决喷气推进系统及喷气推进飞行器在高温、高压、高加热率的极端条件下遇到的问题。另一个是在火箭推进的导弹和卫星的发展中,应用高级控制方法的必要性。

第一个课题使用了两种工具:冯·卡门和钱学森过去在空气动力学研究中用过的相似分析技术和钱学森为此目的而引入并发展的物理力学这个新学科。相似分析将某个由于飞行速度、温度、时间尺度或几何形状而很难或无法实验解决的物理问题,归结为另一个"相似"的问题,后者在实验上更为简便,而且可以得到解决原来问题所必需的结果。他和郑哲敏的合作就属于这类研究:薄壁柱体,例如固体推进火箭的壳体,被快速加热到其弹性性质发生变化的温度,它的应力历史被归结为常温下某个改变了形状的柱体在不同加载条件下的应力历史,而后者很容易用解析或实验方法加以解决。后来在另一篇文章中,钱学森将相似分析应用于超音速机翼或导弹鳍片的快速加热问题。

设计喷气推进系统,经常需要知道极端温度下特殊组分气体的性质或者特殊状态下难得见到的液体推进剂的性质。这些性质常常是不知道的。更常遇到的是,想要得到的状态超出了实验所能达到的范围。为了对付这类问题,钱学森将统计力学的原理发展成被他称为"物理力学"的学科。在 1952 年的开创性论文中,他指出,科学家利用统计力学来证实分子模型的合理性,工程师则必须反其道而行之,利用统计力学,从已知并且可靠的分子模型出发,推导出工程材料的宏观性质。在 1952 年和 1954 年的两篇论文中,他将这个新学科应用于液体性质和极高温度下气体的性质。直到 1955 年,他正规地开了一门物理力学课程,并留下一套出色的笔记,至今仍被用作参考资料。

甚至在喷气推进中心成立之前,钱学森就想把控制论和它在导弹控制和制导上的应用纳入教程。1951 ~ 1952 学年有了这样的机会,那时他的大部分教学任务已由他的同事们承担。另外,他过去的老同事 William Bollay 恰好发表了一篇有关的论文,其中包含了研究生学习所需要的一些背景资料。钱学森的教材一个与众不同的重要特点是没有"实现"部分,也就是不涉及系统部件的设计。因此,《工程控制论》属于工程科学,而不是工程实

践。其后3年钱学森在这个不断成长的领域里从事研究,并指导研究生。液体火箭的稳定性始终是令人困惑而且难以用解析方法处理的问题,因为自激循环含有一个燃烧时间的滞后。1952年,钱学森提供了这个问题的一个很有新意的解,这个解不要求对时间滞后的机理作过细的了解。

钱学森对控制论感兴趣,目的之一是设计一种控制方法,它可以自行寻求复杂系统运行的最佳工作点并在其后一直保持在这个状态。他在麻省理工学院的同事已为内燃机的最佳控制和过程控制制造出了这种装置。1954年,钱学森与他的研究生 Serengecti 合作,对于相当普遍的系统发展了最佳控制,并给出了将“寻的”损失减到最低的设计原则。

在1954~1955学年,康奈尔大学教授郭永怀——钱学森以前的学生和同事,来到加州理工学院作学术休假。当时郭永怀刚完成了平板层流边界层理论的重要推广,并且将一种新概念引入摄动理论。当郭教授将这个概念推广到高超音速边界层时,钱学森认识到,郭的工作是 Poincare 在轨道力学中的摄动理论和近期 Lighthill 扩展摄动解有效范围工作的延伸。于是钱学森撰写了内容广泛的文献评论,对被他命名为 PLK(Poincare - Lighthill - Kuo)法的统一方法的潜力进行了论述。这篇将郭永怀的贡献置于恰当的背景之中的论文,发表于他回国的前夕。他在美国完成的最后一项工作是关于热核电站的研究,第一次对这类装置所需要的巨大尺寸做了估计。

五、结束语

在1936~1955年间,从研究生年代到回国,钱学森对航空和航天的贡献是举世公认的,许多已成为科学和技术文献中的经典之作。让他的朋友和同事高兴的是,这些论文已收集成为一本巨册《钱学森文集,1938~1956》。它不仅能让他的同事和学工程科学的学生们不时回忆起他的远见卓识,而且还表明一个事实,钱学森总是为工程师及时解决所面临的难题。

另一方面,除在少数有幸与他共事的人的记忆中之外,他工作时那种非同寻常的聚精会神、高度的工作强度以及对事业的热爱,既少有记录也鲜为人知。然而他是如此的精雕细刻,所采用方法的精髓不难从他的论文发表后留下的原始笔记、原始分析以及原稿中体会到。对于学者和学生来说,窥视这个创造过程,至少与阅读他的论文同等重要,因为那是永远不会过时的!我很高兴,这些原始笔记的选编《钱学森手稿,1938~1955》已经出版了。

在这篇短文中,通过对塑造他的工作的历史背景和事件的叙述,重新回顾了钱学森的部分工作。这显然是很重要的,因为工程科学家的任务就是对于事件做出反应,并努力塑造它们。我希望,了解钱学森工作的历史背景,能与阅读他的文集和手稿相互补充,使人们有更深刻的体会。

钱学森的技术科学思想

郑哲敏

技术科学思想是钱学森科学思想的重要组成部分。1947年在访问当时的浙江大学、上海交通大学和清华大学时,他向师生们做了题为《工程与工程科学》的报告,回到美国后于1948年将该报告以论文形式发表。1957年他在《科学通报》上发表题为《论技术科学》的论文。这两篇论文对技术科学的内涵和特点,技术科学与自然科学(即基础科学)和工程技术的关系,技术科学的意义和作用,技术科学形成的历史背景,技术科学观点和方法论,技术科学教育等做了全面的论述。这是对技术科学最完整、最系统的概括,起到了全面界定技术科学的历史性作用。

技术科学思想在钱学森全部科学与技术的实践活动中占有重要的位置,在创建和发展我国火箭导弹和航天事业中发挥了十分重要的作用。因此,回顾他的技术科学思想,在今天仍然是极有意义的。在他九十华诞之际,本文谨以钱学森的技术科学思想作文,敬祝他健康长寿。

一、技术科学的历史使命是富国强民

通过自己的科研实践和教学活动和目睹了第二次世界大战中原子武器和雷达技术发展及其对国家和社会的影响,钱学森敏锐地察觉到,战后科学与技术的关系、国家政策与科学和技术发展的关系,发生了深刻的变化并且由此产生了一个新的科学领域——技术科学。他系统地总结了这一历史发展,并于1947年回国访问时,以《工程与工程科学》为题,把它作为礼物献给自己的祖国,意在引起国内科技界的重视。1957年,在向中央提出《建立我国国防航空工业的意见书》和参加制订我国《1956~1967年科学技术发展远景规划纲要》后,又一次在《科学通报》上发表题为《论技术科学》的文章。可见他对在我国发展技术科学的必要性和紧迫性的重视。

在1948年发表的《工程与工程科学》一文中,钱学森一开始便写道:“既然工业是国家富强的基础,技术和科学研究就是国家富强的关键”。到了20世纪40年代中期,人们已经普遍地认识到“如同长期以来的农业、金融政策或者外交关系一样,技术与科学研究现已成为国家的事情”,“虽然在早期,技术与科学研究是以未加计划的、个体的方式进行的,可是到了今天,在任何主要国家这种研究都是受到认真调控的”。

接着,他以原子弹和雷达为例,指出:“纯科学上的事实与工业应用间的距离现在很短了。……为了使工业得到有成效的发展,他们(纯科学家和工程师)间的密切合作是不可

少的”,于是,“纯科学家与从事实用工作的工程师间密切合作的需要,产生了一个新的行业——工程研究家或工程科学家。他们成为纯粹科学和工程之间的桥梁。他们是将基础科学知识应用于工程问题的那些人……”。

由此可见,钱学森视科学和技术,尤其是技术科学为富国强民之本。他以祖国的繁荣富强为目的,一再把技术科学介绍给我国科技界。他希望通过技术科学的研究,缩短由科学研究成果到工程技术成果的周期。回国以后,他本人在科学技术方面的实践也清楚地表明了这一点。

二、什么是技术科学

钱学森指出,技术科学要为工程技术提供有科学依据的工程理论,它是以为工程技术(广义上指一切应用领域)服务为目的的科学。这使技术科学区别于自然科学(现称基础科学)。简单地说,自然科学以认识世界为目的,而技术科学则以改造世界为目的。技术科学也不等同于工程技术,因为技术科学研究工程技术中带有共性的东西,意在使工程设计摆脱传统上以依靠经验为主的局限性,从而加速产业的创新与发展。在《工程控制论》一书的前言中,钱学森写道:“技术科学致力于将工程实践中的设计原理组织成学科,以揭示不同工程实践领域的相似性和强调基本概念的强大威力。”

技术科学以自然科学的理论为依据,创建工程技术所需的工程理论。这首先是因为自然科学的理论有普适性。另一方面,由于自然科学为了弄清楚事物的基本规律,不得不把研究对象置于最简单的条件下,而且因为是追求最基本的规律,自然科学不必,也不能提供为解决工程技术问题而必需的所有规律。然而技术科学研究的对象大多受多种条件的影响或约束,不允许像自然科学那样把条件简化,因而往往没有现成的规律可循。因此,钱学森首先把技术科学界定为自然科学与工程技术间的桥梁,同时指出技术科学研究也是一种富有创造性的劳动。

但是,技术科学又不仅仅限于作为桥梁。钱学森指出:“……我们不能只看到自然科学作为工程技术基础这一方面,而忽略了反过来的一面,也就是技术科学对自然科学的贡献”。就是说,技术科学和工程技术实践也会导致科学上原创性的发现。他进而以工程控制论和运筹学(当时称为运用学)为例,指出在自然科学领域里没有它们的祖先。他还很有预见地提到,技术科学的贡献甚至不限于自然科学领域。这事实上驳斥了一种流行的论点,认为惟有自然科学才是认识的源泉。今天,信息科学和系统学的蓬勃发展进一步表明钱学森当时的认识是何等具有远见。

三、技术科学如何为工程技术服务

技术科学工作者应能回答工程师们提出的一般问题,然而只做到这一点是远远不够的。钱学森指出,技术科学要领导产业的发展。这可以说是科学工作者的最高目标,而且

也是能够做到的。历史上不乏这样的事例。例如,技术科学的先驱、应用力学的创始人L. Prandtl创立了有限翼展机翼理论和边界层理论,一举解决了困惑科学界多年的飞行阻力来源问题,为航空工业的发展开辟了道路。从近处说,由于"两弹一星"在物理和化学等基础科学层次上的问题是清楚的,所以实现"两弹一星"的任务,在科学和技术方面属于技术科学和工程技术的范畴。它的实现是在党的领导下,我国科学家和工程师密切合作的结果,也是显示技术科学重要作用的一个极有说服力的范例。

自然科学的科学家是从科学问题和学科出发选择课题的,个体劳动是主要形式,除大科学工程外,不需要也不可能严密计划。技术科学的科学家则是从工程技术当前和未来的需要确定课题的,在鼓励个人自由创造的同时,常常需要集体的劳动组织形式和必要的计划性。工程技术的需要往往是综合的,所以又需要多学科的合作和相互渗透。对于以实现国家目标为目的的综合性科学技术研究与发展的项目,则需要首先进行顶层设计,在队伍的组织上要体现多学科、有层次、有梯队的全面配置。1956年在钱学森给中共中央的报告《建立我国国防航空工业的意见书》中写道:"健全的航空工业,除了制造工厂之外,应该有一个强大的为设计服务的研究及试验单位,应该有一个做长远及基本研究的单位。自然,这几个部门应该有一个统一的领导机构,做全面规划及安排的工作",这段话集中反映了他的技术科学观点。同时,既然需要多方面的合作,那么做技术科学研究工作就应该具有团队精神,而这也正是钱学森建立中国科学院力学研究所时所经常强调的。

技术科学工作者应当始终立足于创新,要立志于超过前人。他曾说,选题目时就要有超过别人的决心,否则不如不干。这就是说要创新,要争第一。他本人从研究空气动力学到提出稀薄气体力学,从研究火箭发动机到提出物理力学,从研究火箭的控制到提出工程控制论,就是不断地把具体问题的研究提高到科学理论和学科层次上的努力,以便在更广泛的领域内,以新的观点、新的概念、新的方法、新的工具为工程技术服务。这样,也就同时实现了科学上的创新。

四、技术科学的方法论

钱学森认为,为了做好为工程技术服务的工作,技术科学工作者需要掌握三方面的基本功,即扎实的自然科学知识、工程技术知识、高等数学和计算数学知识。书本知识当然是必要的,但是随着时代的前进,知识在不断更新,服务的对象也会有变化,所以钱学森很强调边干边学,很强调学术讨论和自由交流,很强调要同有关科学家和工程师交朋友。他主张,在确定研究课题之后,第一件事是掌握所有有关这个课题的资料和现况,把它作为研究工作的起点。因为,基础知识也好,资料和情况也好,仅仅是工作的准备阶段,还不等于研究工作本身。他说:"……把这些资料印入脑中,记住它,为做下一阶段工作的准备,下一阶段就是真正创造的工作了。创造的过程是:运用自然科学的规律为摸索道路的指南针,在资料的森林里,找出一条道路来。这条道路代表了我们对所研究问题的认识,对

现象机理的了解。也正如在密林中找道路一样,道路决难顺利地一找就找到,中间很可能要被不对头的踪迹所误,引入迷途,常常要走回头路。因为这个工作是最紧张的,需要集中全部思考力,所以最好不要为了查资料而打断了思考过程。最好能把全部有关资料记在脑中。当然,也可能在艰苦的工作后,发现资料不够完全,缺少某一方面的数据。那么为了解决问题,我们就得暂时把理论工作停下来,把力量转移到实验工作上去,或现场观察上去,收集必要的数据资料。所以一个困难的研究课题,往往要理论和实验交错进行好几次,才能找出解决的途径。"他进一步指出,接着就是要根据对问题的认识,建立数学模型和进行计算。在建立模型方面,他十分强调要抓主要矛盾,即"吸收一切主要因素,略去一切不主要因素所制造出来的'一幅图画',一个思想上的结构物"。这样做之所以必要其原因有二:一是加深了对问题实质的认识;二是把问题简化到可以进行计算。钱学森强调计算也有两个原因:一是理论的正确性需要有数值的验证;二是数值结果才是工程师们所能直接使用的。这里表现出技术科学的一个基本思想,那就是一定要把工程技术问题提高到科学理论的高度来研究,同时研究工作的成果不能只停留在理论的议论中或实验室里,一定要使其成为工程师们能理解、用得上的东西。换句话说,技术科学的研究不应当停留在从理论到理论的层次上。

钱学森一向重视计算工作,并且十分关心电子计算机和计算技术的发展。他一贯认为,只要有可能,就要在最大限度内,尽量以计算代替实验工作,因为这样做是最经济的。对于有些极端情况,例如,很高的压力、温度、速度或很小的时间和空间尺度,实验是很困难的。这时从基础科学理论和计算方法上探讨新的途径,就应当特别受到重视。这也正是他提出物理力学这一技术科学分支的初衷。

这里再对前述的技术科学方法论做些补充说明。抓主要矛盾,忽略次要矛盾,并在此基础上,形成清晰的概念,是应用力学学派从 L. Prandtl, Th. von Karman 到钱学森经过长期探索,找到的一种行之有效的方法。通过有领导的、定时的集体讨论,形成哪些该肯定、哪些该否定、哪些该继续探讨的意见,并付之实施,下次开会时首先检查执行情况,是 von Karman 在加州理工学院航空系所倡导和实践的领导和组织科研工作的方法。这体现了在科学研究上的民主集中制。另外,记得在加州理工学院喷气推进中心的一次学术研讨会上,钱学森十分生动地就必须用实验反复检验和修正理论的问题,做了深入系统的发言。这些都是钱学森长期从事科学研究的心得。所以在回国初期,钱学森常不无感慨地说,我们在国外经过长期苦苦探索得来的方法,原来毛主席在《矛盾论》和《实践论》里早已说清楚了。

五、技术科学教育

1947 年,钱学森便主张培养一位技术科学工作者,需要在本科的基础上,再加上研究生阶段,一般共需 7~8 年。因为,一位合格的技术科学工作者需要接受自然科学、工程技

术和高等数学等三个方面的训练,而且这三方面的训练必须是紧密结合的,要克服老式工科教育三者脱节的缺陷。

在他担任古根海姆喷气推进中心主任和讲座教授期间,他曾把他对技术科学教育的思想做了以下简要的描述,“加州理工学院古根海姆航空实验室(GALCIT)首任系主任 von Karman 确立了理论与实践结合,作为科学工程的原则。工程问题应该在全面、不做过分简化的前提下加以研究,所采用的应当是从高等的近代科学获取的最有效的解决方法”。

回国后,无论在创建中国科学院力学研究所与清华大学合作的力学研究班或者中国科技大学近代力学系时,他都坚持了这一原则。

六、钱学森技术科学思想对我们的启示

我认为,钱学森所主张的技术科学仍然是我们今天所需要的。同技术科学相近的另一个名词应是应用基础(科学),但后者只涉及技术科学中基础的部分。然而,值得注意的是应用基础缺少钱学森对技术科学那样全面的界定,这使得应用基础的概念比较模糊,难以准确掌握。例如,在实行中,有人只强调应用而忽视要在科学理论上下工夫,有人只强调基础研究而忘记了研究的目的,以致许多研究长期解决不了问题,学科上也并无实质性建树。基于同样的原因,在研究目标和路线的制订、研究队伍的组织、研究项目的管理、研究成果的评价、研究队伍的培养等方面,也存在不少问题。反过来,如果我们在全面理解技术科学的性质、作用、任务和特点的基础上,按应用目标组织科学研究,那么情况很可能要好得多。

对于科学和技术发展工作政策的制定者和科学研究的管理工作者而言,钱学森的技术科学思想尤为重要。例如,如何制定基础科学和技术科学规划、在基础科学和技术科学的投入应保持何种比例、对待基础科学和技术科学在政策方面应有什么区别、在评价体系上应有什么区别,等等,都同对技术科学的认识密切相关。按照技术科学的观点,应当首先根据国家发展的需要确定国家目标。对于有国家目标的技术科学研究项目,首先应当从世界当前的科学和技术现状作为出发点,紧密围绕所要求达到的工程技术或其他应用目标、来制定技术科学研究规划和计划。在根据工程技术或其他应用目标、制定规划和计划这一点上,这同为基础科学作规划和计划,有显著的不同。为达到这个目标,往往需要多学科的相互配合,需要有不同专业的人参与,这就带来一系列包括选择适当的项目总负责人在内的组织、计划和管理问题。这又涉及在科学技术问题上,如何体现学术上的自由探索、民主讨论和集中决策的问题。由此可见,钱学森技术科学思想向科学和技术政策制定者和科技工作管理者提出了一系列需要着重思考的问题。

技术科学研究与预先研究有密切的关系和相同之处。然而,目前在我国的一些重要领域里,没有把预先研究放到应有的位置上,这不能不说与人们对技术科学缺乏正确的认识有关。在这些产业部门里有所谓“型号带动”的说法,就是说,研究项目必须与具体的产

品型号挂钩,在没有确定产品的型号之前或者在不与具体产品挂钩的条件下,就没有研究经费来源。这种做法必然严重地阻碍基于自己的科学研究成果的新产品的开发,因为如果没有自己的预先研究,也就是说没有超前的研究,怎么会有新概念?怎么会有真正属于自己的新型号?怎么谈得上发展自己的新型号?怎么会有产品的创新?更谈不上开创新的产业了,其结果充其量不过是原有产品的改进。而有些所谓新概念,无非是贩卖国外已有的东西,甚至不过是别人业已丢弃的东西,这种做法如果不予注意,后果将会是十分严重的。难怪许多有识之士惊呼"我们的储备没有了"。

鉴于以上情况,我认为在社会上宣传钱学森的技术科学思想,普及技术科学知识,是很有必要的。我还认为,在科技界,特别是在青年学子和青年学生中,宣传钱学森的技术科学思想,也同样是很需要的。对于后者,我认为应当着重在以下几个方面作宣传。

改革开放以来,通过引进,我国的产业面貌有了很大的变化,取得了显著的进展,这是有目共睹的。然而,改革开放的经验同时也告诉我们,真正的高技术靠引进是拿不来的。这方面的例子很多。怎么办?只有依靠自己的努力。所以,首先应当宣传"科教兴国"的思想,爱国主义的思想,为建设强大的工业化祖国作贡献的思想。要号召有志青年投身到技术科学的队伍中来,用最先进的科学理论和技术来加速我国工业化、现代化的进程。

其次,应当宣传钱学森技术科学论述中提倡的那种严肃的科学态度,踏踏实实、一丝不苟、不怕艰苦的工作作风。作为一个技术科学工作者,还要培养为工程技术服务的热情。对于他人或自己的工作,要把它放在更大的背景里来审视,这样才不至于失去比例,才能正确地做出评价。

第三,应当宣传钱学森在科学上不断攀登和超越自我的思想。科学探索是无止境的,永远不可停滞,同时探索也是有风险的,要经受得起失败的考验,最宝贵的经验往往来自失败,失败是成功之母。

第四,要努力掌握先进的方法论,用先进的哲学思想武装自己的头脑。

在1948年和1957年的文章里,钱学森分别列举了当时处于时代前沿的一些分支学科,其共同特点是,应用前景重要和科学内涵丰富,半个世纪以来世界的科学和经济的发展实践已经充分证明他的远见卓识。现在世界已经进入信息时代和生命科学时代,有更多新的技术科学的领域有待人们去开辟,所以说技术科学是大有发展前途的。

总之,钱学森的技术科学思想具有丰富的内涵和强大的生命力,学习和发扬他的思想将会对我国的腾飞和富强起到重要的作用。认真加以研究,并在实践中加以发展,是我们当代人义不容辞的责任。技术科学是一个十分重要的领域,热切希望经过讨论,技术科学的健康发展能够得到进一步的推动。

以上仅就个人理解,对钱学森的技术科学思想做了些介绍,不当之处,望予指正。

参考文献

1 钱学森文集. 王寿云编. 北京:科学出版社, 1991

2 钱学森. 论技术科学. 科学通报,1957(4):97~104

3 Tsien H S. Engineering Cybernetics. McGraw Hill Book Company, 1954

4 "*The First Twenty Five Years* – The Guggenheim Aeronautical Laboratory of California Institute of Technology. The California Institute of Technology", Pasadena, California, June, 1954

作者简介:郑哲敏 1924年10月生,祖籍浙江鄞县。1947年毕业于清华大学机械系,1952年获美国加州理工学院博士学位,专业为应用力学。中国科学院院士,中国工程院院士。现任中国科学院力学研究所研究员。早期从事热应力、振动与水弹性力学、地震工程力学方面的研究,其1952年对输水管振动的分析为一重要工程问题的解决做出贡献。1960年致力于爆炸力学及其应用的研究,涉及爆炸成形、爆破、地下强爆炸、穿甲破甲、爆炸复合、瓦斯突出、水下沙土爆破等问题。曾获国家自然科学二等奖,国家科技进步二等奖及部委级奖等。1993年当选为美国国家工程科学院外籍院士,并获陈嘉庚技术科学奖。

钱学森在中国导弹航天事业中的科学成就

王永志

2001年12月11日，欣逢著名科学家钱学森九十华诞。这里，我们回顾老一代无产阶级革命家和老一辈著名科学家对我国导弹航天事业的杰出贡献，对我们继承和发扬“两弹一星”精神、继续拼搏努力，使我国航天事业在新的世纪里攀登新的高峰，具有重要的意义。

钱老于1934年在上海交通大学毕业后，次年赴美留学，获得航空、数学博士学位。在美期间，他始终眷恋着自己的祖国。新中国成立后，钱学森立志回国。在经受了长达6年的磨难后，1955年秋天，钱学森终于回到了祖国的怀抱。从此，他以自己渊博的知识，赤诚的爱国之心，投入新中国火箭、导弹和航天器的研究开发工作。在老一辈无产阶级革命家领导下，从培训科技干部做起，克服重重困难，用4年时间研制发射成功我国第一枚近程导弹，又用4年时间研制成功中近程导弹，此后又用两年时间，于1966年使我国有了导弹核武器。短短10年时间，我国导弹核武器得到了飞速发展，开始跻身于世界强国之列。聂荣臻元帅曾说：“这是与学森同志出色的工作分不开的。”

钱老作为我国导弹航天事业的技术负责人，为我国导弹航天事业做出了杰出的贡献。为此，他曾荣获国家科技进步特等奖和“两弹一星功勋奖章”。在1991年国务院、中央军委授予钱学森“国家杰出贡献科学家”荣誉称号和“一级英模奖章”的授奖仪式上，江泽民主席说：“钱学森是我国杰出的科学家，在国内外享有很高的声誉。他在技术科学的许多领域做出了卓越的贡献。特别是在老一代无产阶级革命家的领导下，钱学森以他渊博的知识和对人民事业的热忱，为组织领导新中国火箭、导弹和航天器的研究发展工作发挥了重要作用。”

我第一次听到钱学森的名字是1952~1953年我在清华大学航空系学习时。当时清华大学召开了“抗议美国政府阻挠，声援钱学森回国”的大会。清华大学的著名教授像刘仙洲、梁思成等都在声援大会上发言，介绍钱学森的科学成就、谴责美国对钱学森的迫害。从那时起我知道了钱老是世界著名的大科学家，他为中国人民争了光，令我敬佩。于是我又找到一本《中外科学家小传》仔细阅读了钱老的生平和业绩。我后来到前苏联留学，教授给我们讲课时讲到“卡门—钱”公式，对钱老的这项工作评价极高，并特意指出“钱”是中国人。课堂上的我们都异常兴奋，为中国出了这样一位伟大的科学家而自豪。1957年钱老随聂荣臻元帅到莫斯科访问时，还专程看望了在莫斯科航空学院学习的中国留学生，勉励我们努力学习，早日回国贡献自己的聪明才智，并将他家乡的龙井茶送给我们，这是我

第一次近距离地认识钱老。毕业回国后,我被分配到国防部五院一分院总体设计部,钱老当时曾任五院院长兼一分院院长,恰好在他的直接领导下工作,这是我一生的荣幸。在与钱老的接触中我为他那渊博的知识、严谨的科学态度、民主的作风、不断开拓求新的精神、富有远见的技术见解和科学的组织管理思想所折服。他成为我们心目中的一面旗帜、学习的楷模。下面就我了解的几个方面,回顾一下钱老在发展我国导弹航天事业中的重要作用和杰出成就。

一、促进了新中国导弹事业的起步

钱学森回国不久,在东北参观哈尔滨军事工程学院时,当时任院长的陈赓大将在向钱老征询中国人搞导弹行不行时,他回答说:“外国人能干的,中国人为什么不能干? 难道中国人比外国人矮一截?”在那时钱学森的意见确有举足轻重的作用。

当时,苏联、美国的人造卫星并没有上天,洲际导弹技术在国外也尚未突破。所以对于导弹究竟能不能成为一项重要的国防技术,一般人并没有明确的认识。大家有比较明确认识的倒是飞机。所以当时一个主要的争论是,我们国家要不要搞导弹? 能不能搞导弹? 导弹和飞机的关系是什么?

对此,钱学森认为,飞机的重要性自不待言,而导弹却是有巨大威慑力的新式武器,其作用在第二次世界大战末期已现端倪,飞机与导弹各有所长,在战争中是相辅相成的。他指出,导弹虽然是一种新型武器,但攻克火箭导弹技术并不见得比飞机更难,因为导弹是无人驾驶的一次性武器,而飞机则有人驾驶,且要求多次使用,这在发动机、结构、材料和飞行安全等问题上都有许多特殊的要求。他给大家介绍说,发展导弹在技术上也会遇到许多难关,比如制导问题。当时大家不知道导弹为什么会自动飞向目标。针对这一情况,钱学森给大家讲解了许多制导的原理,其中包括洲际导弹制导原理。他对制导技术的方方面面进行了剖析,并由此得出结论说,这个问题在短期内可以解决。所以导弹作为一种现代武器,应及早引起人们的重视,并列入重点项目予以突破。钱学森还亲自给我军高级将领作报告,讲解火箭导弹知识,分析导弹在未来战争中的作用。他的讲课深入浅出,形象生动,使许多老将军都听得津津有味,并对这一尖端武器产生了极大的兴趣。

1956年2月17日,一份由钱学森起草的关于《建立我国国防航空工业的意见书》(以下简称《意见书》)送到了周恩来总理的案头。《意见书》提出了我国火箭、导弹事业的组织方案,发展计划和某些具体措施。《意见书》提出,健全的国防航空工业,“除了制造工厂之外,还应该有一个强大的为设计服务的研究及试验单位,也应该有一个做长远及基本研究的单位。自然,这几个部门应该有一个统一领导的机构,做全面规划及安排的工作”。《意见书》受到中央的高度重视和充分肯定。

所以,在导弹的起步问题上,以钱学森为代表的老一辈科学家对于党中央、毛主席作出研制“两弹”的英明决策,发挥了重要的技术支撑和促进作用。

二、组建研制队伍拟制发展蓝图

1956年10月8日,党中央决定成立主管研制导弹的国防部第五研究院,并任命钱学森为院长。一年后成立一、二分院,钱老又兼任了一分院的院长。万事开头难,千头万绪的组建工作被他处理得井井有条。在周总理和聂荣臻元帅的领导和支持下,导弹研制工作很快开展起来。

1957年10月苏联答应帮助我们发展导弹,给了一部分教学弹作为样品,所以我们便以仿制起步了。但是不久苏联政府撕毁协议,终止了援助,于1960年6月撤走全部援华专家。我们也从此由仿制转向自行研制。1964年6月我国自行研制的中近程导弹发射成功。在我们初步掌握了导弹技术以后,下一步怎么发展?这个问题摆在了中国科学家面前。这时钱学森受五院党委的委托主持制定我国地对地战略导弹发展规划工作。经过将近一年的讨论,在充分发扬民主的基础上,于1964年制订出《1964~1972年我国火箭技术发展途径的意见》,即"八年四弹规划"。这一规划后因"文化大革命"的干扰,虽未能完全按时实现,但却规划了我国从"中近程—中程—中远程—洲际战略导弹"的发展蓝图。

1965年成立第七机械工业部后,钱学森作为技术负责人又规划了我国防空导弹、海防导弹和潜射导弹的发展问题。

钱学森是位具有很强前瞻性的科学家,对新技术的发展非常敏感。我国第一颗人造地球卫星是1970年发射的,第一颗人造卫星作为型号是1965年正式开始研制的,然而,钱学森探索人造卫星的工作早就开始了。1958年5月,毛主席宣布:"我们也要搞人造卫星!"此后,钱学森便一直在思考我国卫星事业的发展问题。到1964年,我们自己独立设计和研制的中近程导弹试验成功,中程导弹的研制也取得重大进展以后,钱学森感到发射人造卫星已经有了比较可靠的基础,于是在1965年1月,他正式向国家提出报告,建议早日制订我国人造卫星的研究计划并列入国家任务。聂元帅很重视钱学森的建议,指出"只要力量上有可能,就要积极去搞"。1968年2月,国务院、中央军委批准国防科委组建空间技术研究院,担负卫星研制任务,并任命钱学森兼任空间技术研究院首任院长。

我国发射第一颗人造卫星的"长征1号"运载火箭是在中远程导弹的基础上,在上面加一个固体的第三级火箭组成的。钱学森认为,中远程导弹和"长征1号"是在综合了中程导弹技术成就和设计概念的基础上搞起来的,新的因素是高空点火和两级分离。1970年元月,中远程导弹发射成功,并顺利实现高空点火和两级分离。至此,发射第一颗人造卫星用的运载火箭问题基本解决。钱学森就是这样把发射导弹和发射卫星的规划科学地结合了起来。

20世纪70年代中期,当"八年四弹规划"即将完成时,钱学森又开始谋划战略导弹的技术更新换代问题。他纵观国际上战略导弹攻防技术的进展,分析预测未来的发展趋势,不失时机地提出了开始研制第二代战略导弹的建议,并明确了以提高生存能力、突防能力

和打击能力为第二代战略导弹研制工作的重点。这一规划在“文化大革命”刚一结束便付诸实施了。

三、决策重大技术方案,指导关键技术攻关

火箭导弹是一项涉及许多学科领域、有成千上万人参加的复杂的大系统工程。钱学森作为一位知识渊博的科学家,早年在美国读研究生时就奠定了深厚的数理基础,又在20世纪40年代初的第二次世界大战期间,亲自参与过美国早期的导弹研制工程,由这样一位既有丰富的理论知识,又有一定实践经验的人在技术上领导新中国的火箭导弹事业是再合适不过的了。钱老在决策重大技术方案时高屋建瓴、有胆有识,由于他作风民主、善于倾听别人的意见,又勇于承担责任,树立了较高的威望,哪里遇到技术难题,都希望钱老给予指点。

钱老非常敬佩周总理、聂帅的民主和求实的作风。他认为,民主集中制的科学管理是“两弹一星”事业取得成功的一条重要经验。他在五院和七机部担任技术领导人期间,每个星期日下午,总是将几位总师请到他家里,研究讨论重大技术问题。钱老先请每位老总充分发表自己的意见,然后展开讨论。对于意见不一致的,则先由钱老集中,提出解决办法;如在实践中遇到行不通的地方,下次开会再提出来,重新研究。钱老曾说过:“成功了,功劳是大家的;出了问题,责任由我承担”。这样大家都心情舒畅,能畅所欲言。

在发动群众讨论“八年四弹规划”时,他综合大家意见,决定以中程导弹“东风3号”为基本型,加一级构成中远程导弹,再加一旋转稳定的固体级用以发射我国第一批人造卫星。洲际导弹则兼顾发射重型返回式卫星。实践证明,这一技术途径极大地促进了我国战略导弹和航天事业的发展。

在讨论“八年四弹规划”时曾出现了一个焦点问题:我国的战略导弹是采用已经掌握了的低温推进剂(液氧),还是采用常温可长期贮存的推进剂?对此,双方各执一词、长期争论不下,最后经钱老拍板,采用了后者。多少年过后,当我们回忆这段往事时,无不感到庆幸。在重大问题决策的十字路口上,钱老为我们选准了前进的方向。对于中程导弹发动机系统的组成,在当时也有两种可供选择的方案,一种是大推力单管方案,特点是方案简单但技术难度大、研制条件要求高,这是美国的做法;另一种是小推力四管并联方案,方案复杂但研制条件要求低,技术上较易突破。钱老当时坚持从我国国情出发、正确地走自己的路,选定了后者。

1962年,我国自行研制的中近程导弹第一次飞行试验失败后,这支年轻的研制队伍的士气受到了极大的挫伤,这时聂帅的讲话给了大家极大的安慰和鼓励。但技术上如何改进仍不知所措,在这种情况下,钱老亲自带领我们进行了艰苦细致的故障分析工作,通过分析,找到了失败的原因并总结出研制程序上急于求成、违反了客观规律等问题。大家认识到要加强地面试验,并通过试验把故障消灭在地面。于是要建设全弹试车台等许多大

型地面设施。但是大家都没有建设如此大型试验设施的知识和经验,特别是试车台的导流槽设计更是无从下手。于是我们总体设计部请钱老来为我们讲课,我们就是依据他的报告解决了问题。

在中程导弹发动机地面试车过程中,不断发生故障。在这种情况下,大家的心情都很沉重。钱学森来到试车台,他在细心观察故障情况并听取汇报以后提出,我们不能总是让故障牵着走,大家是不是回过头来想想有什么根本问题在影响着发动机的燃烧稳定性?是不是应该考虑高频振荡问题?他的话启示了在场的科技人员。在考虑了高频振荡所产生的影响以后,改进了发动机的设计,从此,发动机的试车顺利过关。

钱老身为著名科学家又是高层领导人,但高度的事业心与责任感促使他经常深入工作现场指导处理技术上的疑难问题。

20世纪60年代,在基地的一次导弹试验中,因在加泄推进剂时操作有误,导致弹体瘪进去一块,这是个大问题。在场的同志都十分紧张,认为这发导弹不能发射了。钱学森听完汇报后,亲自爬到发射架上,仔细察看故障情况后,认为箱体的变形并未达到结构损伤的程度。他结合自己的经验,认为这是由于试加推进剂后,泄出时忘了开通气阀造成箱内真空而压瘪的。发射前,箱内要充气,弹体内压升高,壳体就会恢复原来的形状,所以他主张发射照常进行。由于大家从未经历过这种事情,所以仍心存疑虑。最后这份由钱学森一人署名的报告送到北京以后,聂帅批准了钱学森的意见。结果如他所料,这次发射获得了圆满成功。

钱老的渊博学识和深入细致、民主求实、勇于负责的工作作风,使他在我国导弹重大技术方案决策和关键技术攻关中,发挥了不可替代的作用。

四、言传身教培育年轻的科技队伍

钱学森凭着对祖国导弹航天事业的崇高责任感,十分重视我国导弹航天事业科技队伍的培养,国防部五院刚刚成立,钱学森马上就给刚分配来的156名大学生讲导弹的基本知识——《导弹概论》。在1942年为美国加州理工学院火箭和喷气技术训练班授课的14年之后,钱学森为能在自己的祖国培养新中国第一批火箭、导弹技术人才并授课,感到无比激动。而这批大学生也为自己能亲耳聆听这位世界知名科学家的讲课而感到十分庆幸,他们之中的许多人,后来成为我国火箭、导弹与航天技术队伍的重要骨干。多年以后,一些人对钱学森当年的授课仍记忆犹新,他们说,钱老的课讲得好极了,既通俗易懂,又生动形象。对于这么复杂的尖端技术问题,外行人听了不觉得深奥难懂,专家教授们听了也不感到肤浅平淡。他亲自拟定了空气动力学、发动机、弹体结构、自动控制、电子线路、计算机等有关专业的学习计划。一边讲课,一边结合具体工作,开展讨论,边学边干。这样的导弹技术训练班办了许多期。

钱学森虽然是一位大科学家,但在讨论技术问题时,从不以权威自居,只要你讲得有

道理,大家都服从真理。对于年轻人的创新建议,只要有道理,他同样积极支持采纳。这方面我是有切身体会的。

1964年,改进设计的中近程导弹运抵基地,准备进行全程飞行试验。由于当时的气温过高,发现试验可能达不到预定的射程。经过对液氧温度的重新认识,改变推进剂混合比计算方法后,我向有关领导提出:泄出600kg酒精,减轻导弹的熄火点重量,可以使导弹达到预定射程。这与一般想要增加推进剂的思路正好相反,所以大家开始都不同意。可钱老听完我的汇报后,立即决定采纳我的意见。结果这次试验获得了成功,此后的几发试验按照改进后的混合比均获得成功。

钱老不仅十分重视和支持年轻人的创新建议,而且非常重视锻炼年轻人。20世纪70年代后期制定第二代洲际导弹的研制计划时,钱老首先提出,第二代洲际导弹的研制应由第二代人挂帅,并建议由我担任总设计师,同时在以后的设计工作中给予我很多的具体指导。在这样开明的科学家领导下工作,年轻人都思路开阔、敢想敢干、勇挑重担,许多年轻人都成长为我国导弹和航天事业的骨干力量。

五、科学的科技管理思想

钱学森既是一位科学家,又是我国火箭导弹和航天事业,乃至整个国防科技事业的高层领导人之一。他对火箭导弹研制工作的复杂性和艰巨性有充分的认识。他认为,国防科学技术所从事的"两弹一星"、导弹核潜艇等工作,都是大规模的科学技术工作,技术复杂,涉及面宽,参与的人多,协调性强,所以组织工作非常重要。要按系统、分层次,把各个环节严密地组织起来。在这一套组织系统中,他首先强调要抓总体,抓大总体。他说,现代科学实验的一个突出特点是大集体性,因此,一个型号任务的完成,必须强调其总体工作。我们的业务工作必须强调在民主基础上的集中统一,统一指挥,不能允许各个单位随意去干,那样非失败不可。

他运用并发展了20世纪40年代他在喷气推进工作中获得的经验,提出了航天系统工程的思想并付诸实践。从中国航天计划开始实施的时候起,他就和广大干部、科技人员在周恩来和聂荣臻领导下,把当时苏联航空技术发展中的总体设计部与我国行政组织管理的实际结合起来,这就是今天称为航天系统工程的组织管理。

首先由总体设计部对航天工程进行科学的技术管理(又称技术协调)。总体设计部由熟悉大系统各方面专业的技术人员组成,在总设计师的领导下,根据任务的要求,用系统分析的方法进行大系统指标论证、总体方案(包括技术途径、经济性和可行性)论证、流程设计和系统环境分析,选择总体参数,以确定系统体系结构的组成、功能;从整个大系统的要求出发,提出各组成系统的设计参数和技术要求,将各组成系统结合成一个有机的整体,进行系统试验和系统使用方法的总体设计,提出各种试验和使用设施的技术要求,或对现有试验和使用设施提出采用或改造的建议。

与技术指挥线密切相关的,是行政指挥线,即组织调度工作。对此,钱学森说,我们必须认识到大规模科学实验的多变而又交错关联,一个项目变了,可能牵动全局。因此组织调度工作是非常繁重的,而且这也是干得好不好的关键。计划管理机关用管理信息系统对航天工程实行科学的计划管理,使计划管理人员及时掌握整体计划的全面动态,发现薄弱环节,对拟采取的计划协调措施用网络模型和电子计算机进行模拟,预测措施的效果,为决策提供依据。

航天系统的总体设计机构和计划管理机关,形成了航天工程领导人的参谋机构,前者是航天工程系统总体概念、总体方案、总体设计和技术协调措施科学性的体现者;后者是航天工程系统计划与协调措施的科学性和人、财、物调度权力的体现者。这就是至今仍然行之有效的"两条指挥线"管理体系的由来。

五院建立之初,钱学森就从系统工程的角度提出了组织研制队伍的一整套想法,即:型号院—总体设计部—系统专业所—试制工厂的组织机构,同时设立了一系列独立于型号院的基础研究所。实践证明,这一合理的组织体系,是适应航天工程内在客观规律的,是我国导弹航天事业顺利发展的有力的组织保障。

钱学森不仅在中国的导弹航天事业中做出了卓越的贡献,同时在与"两弹一星"关系密切的航空与空军武器技术,舰船与海军武器技术,无线电、雷达技术,电子技术,激光和光电技术,光学和光学技术,中国科学院基础研究及应用研究,教育及人才培养等众多领域都有许多精辟的论述,对推动这些领域的发展曾发挥了重要作用。

20 世纪 80 年代后,钱老的科学思想更加活跃,驰骋在整个自然科学领域,同时对社会科学也产生了极大兴趣,这一时期他的主要学术贡献包括:系统工程和系统科学、思维科学、科学技术体系与马克思主义哲学等。钱学森不仅将我国航天系统工程的实践提炼成航天系统工程理论,还致力于将航天系统工程概念推广应用到国家和国民经济建设中;他对系统科学最重要的贡献是:发展了系统学和开放的复杂巨系统的方法论。针对 80 年代人工智能的兴起而学术思想却处于混乱状态的情况,钱老站在科技发展的前沿,提出创建"思维科学"这一技术科学部门。

在共和国的科技丰碑上,铭记着为"两弹一星"研制立下不朽功勋的科学家们,钱学森是他们的杰出代表。半个世纪以来,被誉为"中国导弹之父"的钱学森,为新中国的火箭、导弹等事业做出了开创性的贡献。以钱学森为代表的老一辈科学家为壮国威、振军威,增强民族凝聚力做出了卓越贡献。更加宝贵的是通过他们的言传身教为我们培育出"热爱祖国无私奉献,自力更生艰苦奋斗,大力协同勇于攀登"的"两弹一星"精神,在庆祝钱老 90 华诞之际,这更是我辈及后来人要永远牢记并继承和发扬的。

作者简介:王永志　1932 年出生,辽宁省昌图县人。研究员,中国工程院院士,俄罗斯宇航科学院外籍院士,国际宇航科学院院士。现任中国载人航天工程总设计师。1961 年 3 月毕业于莫斯科航空学院火箭导弹设计专业。毕业回国以后,一直工作在原国防部第五研究院一分院(现中国运载火箭技术研究

院)。历任研究室主任、总体设计部主任、研究院副院长、院长,航空航天部科技委副主任等职。从中国第一种自行研制的火箭起,参加了多种火箭的设计与研制。曾先后担任洲际火箭的副总设计师、三种新型火箭的总设计师以及火箭系列总设计师,是长征二号E大推力捆绑火箭的主要倡导者之一和研制总指挥。从1992年起担任中国载人航天工程总设计师,是载人飞船工程设计、研制和发射的技术总负责人。由于在国防建设和发展航天技术方面做出的贡献,获得国家科技进步特等奖1项、一等奖2项,部委级科技进步一等奖4项以及其他奖项,还被记一、二等功各一次,并于1999年获解放军专业技术重大贡献奖。

钱学森带领我们搞航天

孙家栋

适逢钱老九十华诞之际，历数我国航天事业几十年来取得的伟大成就，钱学森作为我尊敬的师长，从他带领我们开创中国第一枚导弹、第一颗人造卫星研制开始的几十年历程中，他一贯提倡并认真坚持以科学的态度，一切从实际出发、一切注重实践，坚持真理、实事求是的学风和品格一直伴随着我。他在长期科学实践中那种以科学的精神研究科学技术、以科学的手段验证科学成果、以科学的眼光培养科学人才的指导思想，在我国自力更生发展中国特色航天事业的各个关键时刻，起到了非常重要的作用。

继20世纪50年代中期我国独立自主研制"两弹一星"开始，几十年来，全国人民共同努力，在当时国家经济、技术基础薄弱、工作条件艰苦的情况下，自力更生、发愤图强，完全依靠自己的力量，用较少的投入和较短的时间，突破了原子弹、导弹和人造卫星等尖端技术，取得了举世瞩目的辉煌成就。从1960年第一枚近程导弹研制试验成功到拥有型号齐全、可满足不同需要发射任务的运载火箭；从1970年第一颗自行研制的人造卫星发射成功到已经逐步形成的多功能、多用途的应用卫星体系，目前我国已成功地发射了不同种类的51颗自行研制的卫星。长征系列运载火箭已进行了65次发射；神舟号试验飞船发射、飞行、再入和回收成功，都标志着我国航天科学技术的重大突破，也标志着我国在航天空间技术、空间应用和空间科学三大领域取得了令人瞩目的伟大成就。

一、实事求是、循序渐进是搞导弹的基本思路

1958年4月，我结束了在前苏联茹柯夫斯基空军工程学院的学习回国，组织安排我到当时国防部第五研究院一分院导弹总体设计部工作，直接参加了中国导弹从仿制和改型设计到自行设计研制的导弹总体工作。当年听钱老给我们讲导弹基础知识《导弹概论》，他用深入浅出的方式将复杂的尖端技术、深奥的导弹理论阐述得清清楚楚的情景至今历历在目。工作中我有幸与钱学森有了很多接触，因此得到了钱老的许多教诲。

当年国家一穷二白，技术基础十分薄弱，钱老却能够在国家发展导弹武器、发展航天技术等重大问题时提出有自己独到之处的设想和建议供中央决策。在国家做出发展导弹决定后的具体实施方法研究中，钱老提出要按照国家当时的实际情况，由浅入深，一步一步做起。首先仿制，然后改型，循序渐进，积累一定经验后必须走自行设计、自行研制的道路。他在组织科技人员翻译和消化苏联的图纸资料，派遣技术人员向苏联专家跟班学习时，强调要按照聂荣臻元帅提出的：通过仿制，"爬楼梯"，大练兵，向独立设计的方向发展。

他1959年10月17日在一次会议上提出:"苏联的设计方案是1959年定案的,但并不是一成不变、万年都妥的方案,以后一定有改进的必要。我们应该解放一点思想,建一点土的设备也是应该的。"他认为,从仿制转入到自行设计应该是灵活的学习,而不是死板的学习,要通过仿制把整个研究院的工作和业务建设带动起来。

钱学森在40年前就提出科学管理是系统工程的主要组成部分,现在回想起来在当时是多么的难能可贵。钱学森注意到,通过仿制要把五院的科研管理和各种规章制度建立起来。针对导弹总体工作,他提出要制定严格的研制流程,要采取切实可行的节点管理。当时我具体负责导弹总体工作,总体部在此指导思想下,制定了中国导弹研制的第一部管理流程。这一管理流程在当时明显地提高了研制工作相互间的协调性,对于产品的正确设计、设计原理正确性的审查验证、数据准确性鉴定、设计质量管理、方案目标管理、人员管理、生产阶段的质量管理、做好预研工作基础上的地面试验及型号整体试验都进行了明确规定。这一试验流程在我国导弹研制的初创时期非常实用有效,为后续型号研制试验中的管理奠定了关键的基础。随着在导弹研制中不断积累经验,我们在此管理流程的基础上又不断地完善和补充,比如把质量可靠性始终当作战略目标来抓,在型号研制的全过程必须强化质量控制,坚持质量控制要以数据验证等等,使型号研制工作逐步走向科学管理的正规道路。

1960年11月5日,钱学森作为P-2(后命名"东风1号")仿制导弹首次飞行试验委员会委员,在我国酒泉发射基地协助聂荣臻、张爱萍组织了这次导弹发射工作。导弹发射成功后,现场科技人员和解放军官兵都禁不住热烈欢呼,聂荣臻、张爱萍等与钱学森热烈拥抱、握手,互致庆贺。聂荣臻在庆贺辞中说:"在祖国的地平线上飞起了我国自己制造的第一枚导弹,这是我国军事装备史上一个重要的转折点。"

从此,中国自行研制试验的"东风2号"导弹、"东风3号"导弹等均相继成功,为我国的航天技术打下了基础,为我国的国防现代化写下了光辉的一页。

二、钱老点名要我搞卫星

1958年5月17日,毛泽东主席在中国共产党八大二次会议上提出:"我们也要搞人造卫星。"同年8月21日,中国科学院把研制人造卫星列为重点任务,成立了以钱学森为组长的581领导小组,负责组织实施空间技术发展规划和业务领导。小组首次提出了我国空间技术发展的早期设想蓝图,组织制定了星际航行发展规划,安排了各项空间技术的预先研究课题,为我国空间技术早期发展做出了大量开拓性工作,对中国航天科学技术领域的进步起到了奠基作用。

1965年1月8日,钱学森分别向周恩来总理和聂荣臻副总理呈送报告,提出我国研制人造卫星的条件已经具备,建议制定我国人造卫星研制计划。同年5月,中央专委同意中国科学院提出的发展人造卫星的规划方案和第一颗人造卫星在1970年左右发射的设想。

从此,中国人造卫星事业进入了有计划的工程研制时期。

在组建中国空间技术研究院时,钱学森着眼于科学事业的未来,大胆启用和培养年轻人。他对我们的关怀和引导,使我扛起了卫生研制总体工作的大梁。1967年炎热盛夏的一天,正当我一心扑在我国自行研制的"东风3号"中近程导弹总体设计改进后试验、发射、数据分析的紧张工作中,接到了钱老推荐、聂老总批准调我到中国空间技术研究院负责组建和领导空间飞行器总体设计部,并担任第一颗人造卫星的技术总负责人的通知。钱老的点名推荐使我从导弹总体研究走入我国第一颗人造地球卫星的研制行列。

他历来坚持大型科学试验要首先从系统工程的角度抓好大系统总体、分系统及子系统的总体。他提出,搞总体工作的人知识面要宽,要既懂工程上的问题,还要有比较广的科学知识。要尽快培养出一批卫星总体设计人员,尽快建立一支卫星总体设计队伍。因此,提出要在加强"东方红"卫星总体设计力量的基础上按型号发展规划为成立卫星总体部创造条件。

卫星工程是一个庞大而复杂的系统工程,虽然科学院组织力量几年来已经做了大量的工作,但国家科学技术刚刚起步,航天技术方面的经验还是相当缺乏,在这种情况下搞卫星确实难度很大。我当时虽说担任过导弹的总体设计工作的负责人,但点名要我出任中国第一颗人造卫星总体设计和卫星总体设计部技术总负责人,我还是深深地感到这副担子的沉重和艰巨,同时也感到钱老对人才培养的意图和对我这样在当时尚属年轻技术人员的信任。他超出人们的习惯范围,给我们这些人从技术攻关、总体建设等各个方面加码,凭着当时的那么一股子冲天的干劲,使我们在挑大梁的过程中有了实践的机会。

当时钱老任空间技术研究院院长,他经常身体力行地为我们做表率,亲自编写教材为我们讲授《星际航行导论》。钱老根据聂荣臻在研制导弹时强调的"凡是科学技术上的事,只能由科技人员定,其他人不能干预"的意见,向技术人员提出在技术问题上要勇于承担责任,要敢于明确发表自己的见解。当时钱老的工作非常繁重,但为了充分发挥技术民主,他在很长一段时间里坚持每个星期都要找出时间和我们研究重大技术问题。在讨论中只要意见一致他便果断决策确定;意见不一致又不是非常急办的,留待下星期的会议讨论;如果是急办的,则由他根据讨论情况提出解决办法。他经常说,我们搞卫星这样的尖端科学技术,强调自力更生,首先要考虑一切从中国的实际出发,还要有明确的实际应用价值。就如我们的火箭水平如果达不到一定程度的时候还谈不到卫星,只有按照从导弹到运载火箭再到卫星这么一个客观步骤才能做出可行的卫星总体技术方案。有一次他还语重心长地对我说,卫星控制方面的仪器能够形成系统,那么其他方面大同小异,卫星平台、有效载荷等等为什么不可以考虑进行归类。应该从系统的角度分析和研究问题,运用系统工程的思想找出相互间的制约关系、牵制影响并解决主要矛盾。虽然卫星自己本身是一个系统,但在整个工程大系统中它并不是一个孤立的系统,做卫星总体应从推进整个大系统的发展出发进行分析问题和解决问题。正如钱老在1962年编写的《星际航行导论》序中讲到的:星际航行技术几乎包括了所有现代科学技术的最新成就。星际航行是组织

和促进现代科学技术的力量,星际航行可以广泛地带动各门科学前进。

在这种指导思想下,我清醒地认识到,卫星这种大型任务必须实事求是地考虑总体的协调性。由于某些技术还处于理论研究阶段尚不具备应用条件,必须根据当时的进展情况在卫星总体方案中进行调整和简化,在满足基本技术指标的原则、保证航天发展实用性、急用性和技术功能的同时,一定要解决发展航天的基本技术,为加速发展下一步型号打下基础,即:在研究第一颗卫星时就想到如何与发展规划衔接。从我参加第一颗人造卫星研制伊始,首先从系统总体角度出发着手制定切实可行的总体技术方案。作为卫星研制的总体技术总负责人,我遇到困难及时请教钱老,在他的指导下各个系统都攻克了一系列技术难关。

当时中国正处于国外的严密封锁时期,研制人造卫星比研制导弹所遇到的问题更多,既无经验又无资料,还缺少必要的试验设备,惟一的出路是走自力更生、独立研制的道路。钱老在我担任中国第一颗人造卫星总体技术负责人给予了极大的信任和支持,让我受益无穷。为了充分发挥技术人员的才智,他总是与我们共同探讨重大技术问题,并且诚恳地说,你们提的建议如果成功了,功劳是大家的;失败了,责任由我来承担。这番话,让我丢掉了许多顾虑,几十年干航天每当遇到重大问题就想起了他勇于负责、善于听取群众意见的工作作风。

当时我们根据第一颗卫星“上得去、抓得住、看得见、听得到”的基本要求,在钱老的支持下,对卫星总体方案作了若干简化性修改。最后确定的“东方红 1 号”卫星分系统组成包括:结构、热控制、电源、乐音装置、短波遥测、跟踪、天线以及姿态测量装置。卫星重173kg,采用自旋稳定方式,运载火箭末级加观测裙与卫星一起在空间运行,可使亮度达到2~3等星。后来,有人提出要在卫星及其仪器上镶嵌毛主席像章,周恩来总理在听取关于运载火箭和“东方红 1 号”卫星情况汇报时,我向周总理汇报了此情况。周总理指示:应当实事求是对待科学,应当从实际出发来对待毛主席像章。在当时的形势下我有这个勇气实际是一个科技人员实事求是搞科学的体现,也是受钱老长期严谨的科学作风影响的结果。1970 年 4 月 24 日,“东方红 1 号”卫星发射成功、运行正常,使中国成为世界上第五个独立研制和发射人造卫星的国家。这次成功为以后各类卫星的研制奠定了经验。“东方红 1 号”卫星反映着当时我国的经济、科技、社会和军事能力发展水平,是国家综合国力的重要标志,是促进经济和科技进步的重要手段,对于增强民族自豪感和凝聚力都具有重要意义。

“东方红 1 号”卫星发射成功后,在钱老的支持下,我又先后担任了“实践 1 号”科学试验卫星、返回式遥感卫星的技术总负责人,担任了“东方红 3 号”大容量通信卫星、“风云 2 号”静止轨道气象卫星、“资源 1 号”地球资源卫星和“北斗导航试验卫星”航天工程的总设计师。航天工程是大量创造性科技劳动的结晶,只有善于组织和引导科技人员发挥集体的智慧和力量,最大限度地调动每一个科技人员的积极性,才能创造出倍增效果的综合科研成果。在工作中,我从钱老那里学到了科学思维方式和科学工作方法,针对航天工程系

统复杂、技术密集、可靠性高、综合性强、风险性大、研制周期长等特点，注重抓系统性、目标性、整体协调性和最佳性的原则，一切从总体目标出发，设计方案力求正确、可靠，最终求得总体合理，确保成功。

三、科学发展永无止境

科学研究要有超前意识、要有前瞻性，这是钱学森的又一重要思想。我曾多次听钱老讲课，至今记忆犹新。20世纪60年代钱老就说，现在的战争讲“地、海、空”，还应当加一个“天”，叫“地、海、空、天”。将来的战争必然会发展到空间，到那时候将会是一场“天军”、“天战”。他当时的科学分析和预见虽然有人认为离现实太远，但仅仅过了三四十年，他当时的科学预见便得到了验证，也使我认识到科学创造和发展永无止境。

当年我国刚开始提出发展导弹武器时，有人担心我们是否有这样的能力？对此，钱老表示了明确的态度，对这些问题给予了科学的结论。另外，钱学森对通信技术、自动化技术、原子能和半导体的研究，都预见过许多重要领域的发展。几十年过后现在再回过头来看，钱老的许多提法和预见都变成了现实。这在当时他的意见起到了举足轻重的作用，对后来的科学技术发展则起到了重要的推动作用。

当前，世界航天高科技发展迅速，我国社会主义市场经济有力地推进了航天事业发展的进程，国家已将开发空间资源、发展航天技术列为国家总体发展战略。本世纪初，国家将逐步建成几个国民经济急需的、长期稳定运行的应用卫星系统，使不同用途的应用卫星在轨道上始终保持一定数量。在通信广播方面要扩大通信广播卫星系统，将要发展大容量、高功率、多波束、长寿命的通信广播卫星，进一步改善中国通信和教育的状况。在对地观测卫星方面将进一步完善和发展气象卫星，建立环境资源卫星系统以监测地球环境，勘测地球资源。在“资源一号”卫星成功运行的基础上进一步提高分辨率，扩展观测波段，延长卫星寿命。在导航定位方面，将加速发展导航卫星，提高指挥和调度交通运输能力；在科学实验方面，将以微重力、空间环境和空间生命科学及新技术实验为重点，继续利用返回式卫星为国内外用户提供航天搭载服务，进行空间微重力材料设备和生命科学研究。同时，还将加速发展小卫星以适应空间探测、科学技术实验和海洋观测等领域的应用需要。

在我们刚刚跨入的21世纪，我国航天事业将主动面向市场、面向社会，坚持为经济建设、国防建设和社会发展服务。将按照多层次、全方位、天地一体化的思路利用空间资源造福国家、造福社会、造福人类。本世纪将是一个创新的世纪，更多的科学成果将会出现，更多的科学奥秘将被揭开。钱老曾经说过：“我作为一名中国的科技工作者，活着的目的就是为人民服务。如果人民最后对我的一生所做的各种表示满意的话，那才是最高的奖赏。”他这段简短的人生座右铭，是钱老鞠躬尽瘁为人民服务，一生以科学的态度追求真理的真实写照，也激励着我们永远要以钱老为榜样，以他那种优秀品质和科学精神作为指导

我们工作的典范。让我们学习钱老开拓创新的科学精神和严谨的工作作风，让中国的科学技术以更快的步伐走向世界前列。

作者简介：孙家栋　1929年4月出生于辽宁省复县。著名运载火箭和卫星技术专家，中国科学院院士、国际宇航科学院院士、国际欧亚科学院院士。1958年4月毕业于前苏联茹科夫斯基空军工程学院。曾担任中国第一个自行设计的中近程导弹总体主任设计师，领导完成导弹总体设计，曾任中国第一颗人造卫星及多颗人造卫星的技术总负责人、总设计师，为中国突破第一代战略导弹的总体技术、突破第一代人造卫星关键技术做出重大贡献。任中国多种应用卫星航天工程大系统的总设计师。先后担任火箭总体设计部副主任、人造卫星总体设计部技术负责人、空间技术研究院院长、七机部总工程师、航天工业部副部长，现任航天科技集团公司高级技术顾问。曾荣获国家科技进步特等奖2次，荣获国家“两弹一星”功勋奖章。

钱学森与辩证唯物主义

黄楠森

钱学森是我国杰出的科学家,他不但对中国高科技的发展发挥了巨大作用,在世界科学界也享有崇高的声誉。就是这样一位一直活跃在科学发展前沿的科学家,自觉地信奉辩证唯物主义,这当然与他政治立场的转变有关,但更重要的是由于他对人类科学体系和科学史的正确理解。钱学森同志的辩证唯物主义思想虽然不是由他独创地从现代科学中概括出来的,而是通过马克思主义的中介,但它在现代科学中有其深厚的基础确实是非常明显的。现在我国哲学界对辩证唯物主义的评价分歧甚大,听一听这位杰出科学家如何看待辩证唯物主义,一定会给我们很多发人深省的启发。

我本来想充分搜集钱学森同志的哲学言论,加以深入系统地研究,全面论述他关于辩证唯物主义的观点,但由于种种原因,现在我只能讨论他的现代科学技术体系与辩证唯物主义的关系,并在其观点的启发下来评价一下近年来关于辩证唯物主义的错误观点。

一、世纪之交一股强劲的否定辩证唯物主义世界观的思潮

在这世纪之交,我国马克思主义哲学——辩证唯物主义与历史唯物主义的命运受到广泛的关注,许多哲学家或在会议上发言,或写文章,来反思它的过去,考察它的现在,展望它的未来。人们发表了十分分歧的意见,其中不乏根本否定马克思主义哲学,特别是辩证唯物主义世界观的观点,辩证唯物主义世界观几乎成了许多观点围攻的中心。他们把辩证唯物主义与历史唯物主义叫做正统的或官方的马克思主义哲学、传统的即非现代的马克思主义哲学、讲坛哲学、教科书哲学、教条主义哲学、僵化哲学体系等等。他们立论的根据是什么呢?概括起来,大致有以下几点。

1. 辩证唯物主义不是马克思的哲学

他们认为马克思没有称自己的哲学为辩证唯物主义,有的人认为辩证唯物主义是斯大林的哲学体系,有的人承认它是恩格斯的哲学和列宁的哲学。那么,马克思的哲学是什么呢?有各种回答:或是实践唯物主义,或是实践哲学,或是人本主义,或是实践人本主义,或是辩证方法,或仅仅是历史唯物主义。现在流行着一个口号:“回到马克思”,或是“走近马克思”。有的人强调要挖掘马克思论著中过去被忽视了的思想,但对有的人来说,其潜台词是:恩格斯以来,离马克思越来越远了。有的人说的马克思实际是青年马克思,按照这种理解,《共产党宣言》发表以来,马克思离他自己也越来越远了。

2. 辩证唯物主义已经远远落后于时代的发展

他们认为辩证唯物主义是19世纪末期和20世纪初期的哲学,七八十年以来世界形势已经发生了很大的变化。它没有反映20世纪,特别是第二次世界大战以后的科技革命。现当代西方哲学也有了很大的发展,比较起来,现当代西方哲学是与同时代的发展相适应的,而辩证唯物主义和历史唯物主义是与时代的发展格格不入的。那么,有哪些地方格格不入呢?根据近期发表的文章,有一种观点甚为流行,即认为西方哲学史已经有了几次形态转换,而辩证唯物主义还停留在本体论形态。关于西方哲学史有几次研究对象、研究方向、表现形态的转换的观点,谈的人很多,说法各异。一种观点认为古代的哲学是本体论,近代的哲学是认识论,现代哲学是实践论,当代哲学是人学;另一种观点认为古近代哲学的思维方式是主客两分,现当代哲学的思维方式是主客统一;第三种观点认为古近代哲学研究实体,现当代哲学研究关系。马克思的哲学属于现当代,而辩证唯物主义和历史唯物主义属于近代;第四种观点认为辩证唯物主义见物不见人,而现当代哲学的研究对象离不开人,马克思虽然自称是唯物主义者,却不属于见物不见人的辩证唯物主义。在哲学转向的思想影响下,有不少人认为哲学的对象不再是作为一个整体的、客观的物质世界及其一般规律,而是人与世界的关系;有的人说哲学的对象是主体和客体的关系,或者说是知识,或者说是实践,或者说是人或属人世界;还有的人认为马克思主义哲学的对象是人类社会的历史,它只是唯物史观;有的人认为马克思主义哲学的对象是人类社会的历史,它只是唯物史观;有的人认为马克思主义哲学的对象是思维方式,它就是方法论。总之,马克思主义世界观——辩证唯物主义是难以继续存在下去,它已经过时了。

3. 哲学不是知识,不可能成为科学,而是个性化的思想意识

在他们看来,哲学根本不是科学。科学是有客观标准的,因而是能达到共识的。马克思主义哲学自认为是科学,要求人们在哲学思想上达到尽可能的共识,这是与科学的根本性质相违背的。

持以上观点的学者都自认为是马克思主义者,有的是改革开放以来崭露头角的中青年哲学家,有的是从事马克思主义哲学研究和教学工作达数十年的资深学者、教授。这种现象在贯彻"双百方针"和开展学术研究的过程中出现是正常的,甚至可以说是不可避免的,但是我认为马克思主义理论界也不能对这种现象采取放任自流的态度,不予理睬,而应该辨明是非、澄清混乱,使马克思主义哲学能够适应时代的发展而健康地发展。近年来,确切地说十多年来,我就在从事这一工作,一方面同我认为是错误的观点争论,一方面反省辩证唯物主义和历史唯物主义本身原有的缺点和问题,分辨它的观点哪些是正确,应坚持哪些过时了,应改变或否定,以便在条件成熟的时候建构马克思主义哲学的新形态。在这过程中,我对钱学森的哲学思想,特别是他对辩证唯物主义的态度和观点,有所了解。他的思想使我受到极大的鼓舞和启发。他并没有参与哲学界的争论,没有全面回答和分析那些否定辩证唯物主义世界观的观点,但他的思想确实对那些否定辩证唯物主义世界观的观点,特别是对辩证唯物主义过时论,从科学技术革命的角度,筑起了一道难以超越

的铜墙铁壁。我没有系统研究过钱学森的哲学思想,下面只是就我所了解的他的部分辩证唯物主义的言论,特别是他如何规定辩证唯物主义在它的现代科学技术体系中的位置,谈谈我受到了哪些启发。

二、钱学森同志现代科学技术体系中辩证唯物主义的位置

科学发展到今天,人们几乎已达成了一个共识:由于整个宇宙是一个系统,对这个宇宙的分门别类的研究,即不同层次和不同领域的科学,也应该是一个通过各式各样直接或间接的复杂的联系而形成的体系。实际上随着科学的发展也正在形成一个体系。从这个意义讲,多门科学成了一门科学。马克思在一百多年前已经提出过一门科学的思想,今天可以说多数人已经认可这个思想,科学家们或哲学家们已经提出过多种科学体系来表现宇宙这个系统,钱学森提出的现代科学技术体系是其中很有特色的一个。

钱学森从现代科学技术的发展情况出发,把科学技术分为 11 大部门,即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、军事科学、行为科学、地理科学、建筑科学和文艺理论。除文艺理论外,每一部门又分为三个层次:基础科学、技术科学和工程技术。这种分类是发展的,将随着科学情况的发展而发展变化。实际上,在钱学森同志那里已经有过多次变化,最初曾提出过四大部门,后又提出过九大部门、十大部门,原来没有建筑科学,现在加上了。

这种分类体现了钱学森对现代科学技术情况的独特的理解。特别令人感兴趣的是他用什么方式来表达现代科学技术的统一性,他采取的方式就是用辩证唯物主义及其 11 个部门哲学来把这 11 门类科学联系成为一个整体,这样这个现代科学技术体系就呈现出三个层次:第一个层次是辩证唯物主义;第二个层次是自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、人天观、军事辩证法、社会论、地理哲学、建筑哲学和美学;第三层次是前面列举的 11 门科学。钱学敏教授给我提供的一封书信中,钱学森把社会论改为人学,以与行为科学相对应。第二层次与第三层次一一对应,成为第三层次与辩证唯物主义的桥梁。如图 1 所示。

从这个科学技术体系我们可以看出,钱学森把辩证唯物主义世界观摆到了科学技术的顶尖地位,不仅是哲学的核心,实际上成了整个科学技术体系的核心。

<table>
<tr><td rowspan="2">哲学</td><td colspan="11">辩证唯物主义</td></tr>
<tr><td>自然辩证法</td><td>唯物史观</td><td>数学哲学</td><td>系统论</td><td>认识论</td><td>人天观</td><td>军事辩证法</td><td>人学</td><td>地理哲学</td><td>建筑哲学</td><td>美学</td></tr>
<tr><td>基础科学</td><td rowspan="3">自然科学</td><td rowspan="3">社会科学</td><td rowspan="3">数学科学</td><td rowspan="3">系统科学</td><td rowspan="3">思维科学</td><td rowspan="3">人体科学</td><td rowspan="3">军事科学</td><td rowspan="3">行为科学</td><td rowspan="3">地理科学</td><td rowspan="3">建筑科学</td><td rowspan="3">文艺理论</td></tr>
<tr><td>技术科学</td></tr>
<tr><td>工程技术</td></tr>
</table>

图1 辩证唯物主义与科学技术体系的关系

三、钱学森的现代科学技术体系的哲学内涵

从钱学森在他的科学技术体系中如何安排哲学的位置,特别是辩证唯物主义世界观的位置,我们可以引申以下一些哲学思想。

第一,哲学,确切点说,马克思主义哲学,即辩证唯物主义及其部门哲学,是科学技术体系的成员,它们都具有真理性,即科学性。哲学与科学并无本质区别,他们的差别不过是科学与科学间的差别,即研究对象和对象层次间的差别。钱学森明确地说:"把马克思主义哲学放在科学技术体系的最高层次,也说明了马克思主义哲学的实质:它绝不是独立于现代科学技术之外,它是和现代科学技术紧密相连的。"

第二,辩证唯物主义是世界观,辩证法是世界观的一部分,认识论和唯物史观是部门哲学。哲学界的流行说法是:马克思主义哲学是辩证唯物主义和历史唯物主义,而辩证唯物主义和历史唯物主义是共产党的世界观和方法论。还有些人认为哲学就是认识论,也有些人认为马克思主义哲学就是唯物史观。这些说法都是不确切的。这种混乱,我认为可能是由于"哲学"这个含糊不清的名称引起的。科学都是以对象命名的,可以顾名而思其对象。而哲学则否,这就给随意理解其对象提供了可能。按其内容加以分析,辩证唯物主义和历史唯物主义可分为三部分:辨证唯物主义包含宇宙观和认识论,历史唯物主义即历史观,因此,笼统称之为宇宙观是不确切的,称之为方法论更不确切。方法论应该是以方法为研究对象的科学,但辩证唯物主义和历史唯物主义中并没有这个内容,有的是方法,即原理的应用。方法与方法论不是一回事。辩证唯物主义与历史唯物主义被称为方法论可能与其中的辩证法部分有关,辩证法首先不是方法而是理论。Dialectics 一律译为辩证法是不确切的,辩证法作为方法可以译为辩证法,但作为客观规律应译为辨证律;作为理论,应译为辨证论。我并不主张改变习惯译法,但应有正确的理解。我认为钱学森的科学体系的安排是科学的。看来他是从科学的研究对象出发来作此安排的。他把认识

论、唯物史观与辩证唯物主义区别开来，把辩证唯物主义视作最高层次的世界观，而把认识论与唯物史观作为部门哲学，视作辩证唯物主义世界观与思维科学、社会科学联系的桥梁。这样他所说的辩证唯物主义在内容上已不同于一般教科书所说的辩证唯物主义，而是唯物主义的辩证的世界观。

第三，部门哲学是辩证唯物主义与一切科学技术联系的桥梁，辩证唯物主义通过部门哲学而从科学技术汲取丰富和发展自己的营养，而各门科学技术则通过部门哲学从辩证唯物主义取得认识世界和改造世界的一般方法，即哲学的思想指导。这个科学体系实际是一个多层次的、金字塔式的体系，每一门基础科学又包含若干层次的部门科学和交叉科学，使之成为一个以辩证唯物主义为塔尖的、上部数量较少而一般性强的、下部数量较多而特殊性强的、各种科学和技术纵横交错的有机整体。要用一个理论体系或一个图表来完整地、严密地描绘出客观存在的现代科学技术体系是很困难的。但钱学森的关于现代科学技术体系的思路是科学的、符合实际的，它有利于克服分门别类的研究和职业分工所带来的只分不合、孤立片面的思维方式，更有利于克服把哲学排斥于现代科学技术之外的错误倾向。钱学森明确指明了哲学与科学技术的这种互相依赖和互相推动的关系，他在《科学学、科学技术体系学、马克思主义哲学》一文中说："哲学作为科学技术的最高概括，它是扎根于科学技术中的，是以人的社会实践为基础的；哲学不能反对也不能否定科学技术的发展的，只能因科学技术的发展而发展，不然岂不僵化了吗?"又说："在本世纪杰出的理论物理学家如 A. 爱因斯坦和 W. 包利，尽管有他们的局限性，都对自然辩证法的发展作过贡献。"另一方面则是马克思主义哲学的指导作用，他说："马克思主义哲学作为科学技术的最高理论，就必须用来指导科学技术的进一步发展。……自然科学、数学，以及技术科学、工程技术都必须以自然辩证法为指导。"后来他在《社会主义现代化建设的科学和系统工程》一书中对马克思主义哲学与科学技术的关系有一段全面的、完整的论述，他说："所有的科学技术工作，自然科学、社会科学、技术科学、数学、工程技术，不用马克思主义的哲学来指导，或者不重视马克思主义的哲学对于科学研究的指导作用，是危险的。我们一方面必须认为马克思主义哲学本身是要发展的，它要随着人类社会实践的积累而发展。发展了的自然科学、社会科学、数学、技术科学、工程技术，又影响马克思主义哲学的发展。另一方面，我们也必须承认马克思主义的哲学在任何时候都对于科学技术的发展有指导的意义。这就是理论和实践的辩证的关系。科学技术的整个体系包括哲学。六个组成部分，随着社会实践的发展还会有变化。"

第四，哲学通过现代科学技术体系而与人类的认识活动和实践活动以及外部客观实践相联系，这种联系是间接的，但在一定情况下也可以产生直接的联系。有的人认为哲学是虚无缥缈、脱离实际的纯思辨的东西，也有人不否定它同实践活动和外部世界的联系，但这个联系仅仅是间接的，不是直接的，因而无法用实践来检验哲学命题的真理性。但钱学森的整个现代科学技术体系，包括哲学，都是建立在实践及其经验的基础上，是整个客观世界的反映，其中任何一个部分归根结底都应以实践来检验，这种检验有的是间接的，

有的是直接的,但很难讲有一部分仅仅是间接的而不可能是直接的。钱学森认为"马克思主义哲学,辩证唯物主义是人类知识的最高概括","也是人的一切实践的概括"。钱学森在给钱学敏教授的一封信中指出,马列主义要发展,绝不能脱离实践。他提出:一,要联系实际,多做社会调查。二,要知道今日社会科学和自然科学、工程技术的新进展,多与第一线的人交流讨论,也可取参加科技新发展的研讨会,多多吸取营养。三,对中国古代哲学思想也要取其精华,不能盲目崇古!四,一定要分清是非,不能跟洋人跑,搞"西化"。这些意见我认为对今天坚持和发展马克思主义哲学的工作是有很大的启发意义的。钱学森是十分重视解放思想、开拓创新的,但他并不主张怀疑一切,他说:"科学是无禁区的,但首先要看那个'禁区'的区存在不存在。"他举例说,"有限宇宙"、"永动机"都是海市蜃楼。这话对于那些不要坚持只要发展的人是一个忠告。

我认为钱学森所表述的哲学观点和我从他的科学技术体系中所引伸出来的哲学观点,同我前面所介绍的那些错误观点,是不相容的。他没有直接涉及哲学转型论,但按照他所了解的马克思主义哲学,认为世界观(本体论)、认识论、历史观、人学都是哲学家族的成员,没有谁取代谁的问题,它们同时存在,各不相悖。他的观点同辩证唯物主义过时论是根本对立的,在他那里,辩证唯物主义的身份(世界观)明确了,不但没有过时,而且永远不会过时,虽然它要不断发展,但已与人类的科学和实践结下了不解之缘。至于哲学非知识论,其谬误更是显而易见的。如果哲学不是知识,不是学科,而是个性化的思想,它们还能成为现代科学技术体系的成员吗?经过这一番简短的考察,我的最后结论是:哲学家们,尤其是马克思主义哲学家们,听一听科学家们的声音吧![❶]

参考文献

1 列宁选集(第2版第2卷)

2 钱学敏.试论钱学森"大成智慧学".首师大学报,2001(3)

3 科学学、科学技术体系学、马克思主义哲学.哲学研究.1979(1)

4 钱学森.社会主义现代化建设的科学和系统工程.北京:中共中央党校出版社,1987

作者简介:黄楠森 1921年出生于四川省富顺县。1948年毕业于北京大学哲学系。曾任北京大学哲学系教授、系主任,中国马克思主义哲学学会会长、北京市社科联副主席;现任《北大学报》编委会主任、北京大学人学研究中心主任、北京大学邓小平理论研究中心研究员、中国人权研究会常务理事。代表作有:《马克思主义哲学史》(8卷本,主编,获1997年"五个一工程"奖、吴玉章奖,1999年首届国家社会科学基金项目优秀成果一等奖)、《〈哲学笔记〉与辩证法》、《哲学的足迹》、《人学的足迹》、《黄楠森自选集》、《必须坚持辩证唯物主义》(论文,获1999年"五个一工程"奖)。

❶本文在写作时,承蒙中国人民大学钱学敏教授提供了部分资料,特别是钱学森给她的私人信件,并允许引用其中部分言论,特此致谢!

钱学森对系统科学、思维科学的重大贡献

戴汝为

在国务院、中央军委于1991年10月授予钱学森“国家杰出贡献科学家”荣誉称号的大会上，他讲过一段话：“我认为今天的科学技术不仅仅是自然科学工程技术，而且是人认识客观世界、改造客观世界整个的知识体系，这个体系的最高概括是马克思主义哲学。我们完全可以建立起一个科学体系，而且运用这个科学体系去解决我们社会主义建设中的问题。”并讲：“我在今后的余生中就想促进这件事情。”

实际上，钱学森所说的建立一个科学体系的工作，他早在20世纪70年代末就开始了，到目前为止已经形成了一个包括11个科学技术部门的现代科学技术体系。这里我们对这个现代科学技术体系中由钱老倡导与开创的系统科学与思维科学两大科学技术部门的情况作一些介绍；并介绍他把系统科学与思维科学两者的一些构思结合起来，提炼出开放的复杂巨系统、处理开放的复杂巨系统的方法论——从定性到定量的综合集成法，以及人机结合、以人为主的从定性到定量的综合集成研讨厅体系，从而形成“大成智慧”学术思想的来龙去脉。

1954年，在钱学森回国前美国出版了他的专著《Engineering cybernetics》（工程控制论）。紧接着此书的俄文、德文、中文译本在相关国家先后出版。《工程控制论》一书获1956年中国科学院自然科学一等奖。该书以其创新性、前瞻性而闻名，对培养我国新一代自动控制方面的专家起到了十分重要的作用，并在国际上获得极高的声誉；同时该书在50年代是自动控制领域中引用率最高的专著。2000年国际著名的自动控制理论专家Aström在他刚出版的一本新书中，一开始就引用了《工程控制论》“序言”中的一段话：“这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可是在其他各门自然科学中这些因素都是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质以及整个系统的总的运动状态。”如果我们着眼于物理世界三个要素的分析：物质、能量和信息，那么控制论只研究信息与控制，不讨论能量和物质。由此可以看出钱学森早在1955年以前已经把研究的着眼点转到“信息与控制”方面了。

1978年9月27日，钱学森与许国志、王寿云在上海“文汇报”上发表了题为《组织管理的技术——系统工程》一文。这篇文章被誉为系统工程在我国发展的一个里程碑。他与王寿云、柴本良合作完成了军事系统工程的文章，于1979年7月24日在中国人民解放军总部机关领导同志学习会上作了演讲，从而把系统工程用于军事领域，形成“军事系统工程”。

20世纪80年代初,钱学森组织并参与了系统科学、思维科学和人体科学三个讨论班,倡导开展思维科学的研究。在此之前,国防科工委召开了一次很重要的关于大型计算机发展的研讨会;接着在涿县召开了关于第五代计算机的会议。70年代,日本提出了一个国家计划,叫做模式信息处理计划,主要是关于语音识别、文字识别、图像识别等的模式信息处理计划。80年代日本人又提出了知识信息处理计划,或称为第五代计算机计划。他们声称要把日本的知识信息系统推向世界,进行一场人工智能对世界的挑战。美国也制定了高性能计算机计划。当时各国都很重视计算机的发展,因为计算机是一项信息的核心技术。钱学森提出要进行思维科学研究,不是偶然的,而是与人工智能、智能计算机等有十分密切的关系。

1980年他在《中国社会科学》第6期发表《从现代科学技术的发展》的文章中提出"思维科学",谈到:"我们要把逻辑学扩大为思维学,包括一部分我们已经研究得很多而且很有成绩的逻辑思维,还要包括其他的人的思维过程。这在外国已逐步地引起重视,他们是从搞机器人、人工智能这方面考虑的,搞人工智能、机器人,就要搞一个人工智能、机器人的理论,这个理论他们叫认知科学(cognitive sciences),我们用'思维科学',更确切一点,就是包括逻辑思维,也包括其他各种思维过程,形象思维等。"

后来他在1984年举行的全国思维科学会议上,提出思维科学研究的突破口在于形象思维的研究。1986年他又明确地指出:"思维科学的研究,我仍然以为其突破口在于形象思维学的建立,而这也是人工智能、智能机的核心问题。因此,这也是高技术或尖端科学技术的一个重点。我们一定要抓住它不放,以此带动整个思维科学的研究。"

形象思维是比较难研究的。开展形象思维研究,与模式识别非常有关系。前面说到,cognitive sciences,叫做认知科学。认知是 cognition;模式识别是 recognition,意思是再认知。心理界把识别叫再认知。举个例子。对于你的一个朋友,先通过你的感官,对他的一些特征了解了,留下了印象,下回你再一见他,你就认识他了。这就是 recognition,再认。我们就叫识别。可见,模式识别跟形象思维是有关系的。

1995年3月,钱学森通过通信的方式,对思维科学的研究作了界定:"我们要进一步分清什么是人体科学,什么是思维科学。现在我想所谓感觉和知觉都是人体科学中神经心理学要研究的领域,而更上一层的所谓感受则是精神学的研究领域。只处理所获得的信息,那才是思维学的研究课题。"

对于信息来说,有信息的采集、信息的传输、信息的处理、信息的存储等等环节,他这里讲得比较清楚:"只处理所获得的信息,那才是思维学的研究课题。"他的观点也是在变的。如果说,认知科学、认知心理学是从信息处理的观点来研究心理学的话,那么,思维科学只考虑信息处理,他把其他划到人体科学的范畴。

"思维学的任务就是研究怎样处理从客观世界获得的信息,包括 Popper 的'第三世界'这个非常重要的信息源信息库,以获得改造客观世界的知识。处理可以只是人干,也可以人机结合(机器干一部分)。"这是他多年来对于人机结合问题思考的重要结果。他对思维

科学的研究下了如下的界定:“这样看思维学就只有3个部分:逻辑思维——微观法;形象思维——宏观法;创造思维——微观与宏观结合。创造思维才是智慧的泉源;逻辑思维和形象思维都是手段。”

总之,思维科学是关于人脑对信息处理的研究,从信息处理的角度看,人脑与电脑相结合是非常自然的,它们都是做信息处理的。人机结合,可以充分发挥人的性智与机器的高性能,这也是钱老的一个非常重要的观点。这个学术思想是很重要的,可以概括为:以人机之结合,集智慧之大成。如果没有从信息处理的角度去研究思维的话,那当然不好说了。更重要的是,将来有了信息网络,普遍地使用信息网络,那么看起来似乎地球变小了,某个地方发生一点事情,地球上其他地方通过信息网络,很快就能知道。坐飞机,一天之内可以达到地球任何一点,而且外界有那么多的信息,人慢慢地就变得更聪明了。但是信息太多了,哪些是你要的,哪些是你不要的,仅靠人处理不了,要有智能技术,有些要计算机帮助人去做。如果你需要什么信息,现在研究的agent,所谓的代理者,就可帮你去找。你只要找上几次,它就了解你要找什么,它给你去找。这些也都要研究,这些研究也是与思维科学很有关系的。

1990年,《自然杂志》第一期发表了钱学森的重要文章,题为《一个新的科学领域——开放的复杂巨系统及其方法论》。该文将作者80年代初对处理复杂系统所概括的“经验和专家判断力相结合的半经验半理论的方法”进一步地加以提高和系统化,提炼出“开放的复杂巨系统”的概念;并以系统论的观点,在社会系统、人体系统、人脑系统及地理系统实践的基础上,提出处理“开放的复杂巨系统”的方法论,即“从定性到定量的综合集成法”(Metasynthesis)。钱学森认为这个综合集成法实际上是思维科学的一项应用技术。

“从定性到定量的综合集成法”,其实质是把各方面有关专家的知识及才能、各种类型的信息及数据与计算机的软、硬件三者有机地结合起来,构成一个系统。这个方法的成功之处就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势,为综合使用信息提供了有效的手段。按我国传统的说法,把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来,达到对整体的认识,称之为“集大成”。实际上,“从定性到定量的综合集成技术”,就是要把各种情报、资料、信息,把人的思维,思维的成果,人的经验、知识、智慧统统集成起来,因此可以称为“大成智慧工程(Metasynthetic Engineering)”。

钱学森在提出“从定性到定量的综合集成法”的过程前后有一个明确的观点,即:面对开放的复杂巨系统,这类问题应采取的对策是“人—机结合”、以人为主的综合集成,需要把人的“心智”与计算机的高性能两者结合起来。他总结了在思维科学与智能机有关问题的讨论过程中所得出的看法:“我们要研究的不是没有人实时参与的智能计算机,是‘人—机结合’的智能计算机体系!”他借鉴我国哲学家熊十力把人的心智(human mind)概括为“性智”与“量智”两部分,对“人—机”结合作了解释。我们可以这样理解:“性智”是一种从定性的、宏观的角度,对总的方面巧妙加以把握的智慧,与经验的积累、形象思维有密切的联系,人们通过文学艺术活动,不成文的实践、感受得以形成;“量智”是一种定量的、微观

的分析,概括与推理的智慧,与严格的训练、逻辑思维有密切的联系,人们通过科学技术领域的实践与训练得以形成。"人—机结合"是以"人"为主,"机"不是代替"人",而是协助"人"。从信息处理的角度来考虑,把人的"性智"和"量智"与计算机的"高性能"信息处理相结合,达到定性的(不精确的)与定量的(精确的)处理互相补充。目前人们清楚地认识到计算机能够对信息进行精确的处理,而且速度之快是惊人的,但它的不足之处是定性的(不精确)处理信息的能力很差。尽管研究者将一系列近于定性处理信息的方法引入计算机系统中,企图完善其处理能力,但对于真正复杂的问题,计算机则还是难以解决。与此相反,与计算机相比较,人处理精确信息能力是既慢又差,但是定性处理信息的能力是十分高明的。因此在解决复杂问题的过程中,能够形式化的工作尽量让计算机去完成,一些关键的、无法形式化的工作,则靠人的直接参与,或间接的作用,这样构成"人—机结合"的系统。这种系统既体现了"心智"的关键作用,也体现了计算机的特长。这样一来人们不仅能处理极为复杂的问题,而且通过"从定性到定量的综合集成",达到"集智慧之大成"。

1992年,在"从定性到定量的综合集成法"的基础上,钱学森针对如何完成思维科学的任务——"提高人的思维能力"这个问题,汇总了几十年来世界学术讨论的seminar,C^3/I工作及作战模拟、人工智能、灵境技术(virtual reality)、人机结合的智能系统,及系统学等方面的经验,进一步提出我们的目标是建成一个"'人—机结合'、以人为主、从定性到定量的综合集成研讨厅体系",简称"从定性到定量的综合集成研讨厅"(Hall for workshop of Meta-synthetic Engineering)。这是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的"厅",这是把专家们和知识库信息系统、各种人工智能系统、每秒几十亿次的计算机等像作战指挥厅那样组织起来,成为巨型的"人—机结合"智能系统。"组织"二字代表了逻辑、理性,而专家们和各种"人工智能专家"系统代表了以实践经验为基础的非逻辑、非理性智能。所以这个"厅"是21世纪的民主集中制的"工作厅",是辩证思维的体现。

1993年美国政府提出"国家信息基础设施(NII)计划",即人们易于接受而且经常谈到的"信息高速公路"计划后,引起国内外十分关注信息网络的建设。钱学森一直对信息技术在我国的发展极为关心。1995年6月20日他写信给他的同事们,对信息网络有关问题发表了自己如下的看法:

(1)现在我国也在开始信息网络建设,这是第五次产业革命的先声。

(2)大家似尚未意识到信息网络加用户将构成一个"开放的复杂巨系统",不是简单巨系统,更不是大系统、小系统等容易调控的系统。

(3)前见英刊《New Scientist》中就有文论及新加坡政府原来热衷于进入全球信息网络,以促进其经济发展,现在也察觉到这会引起许多难以调控的问题,所以政府决定放慢此过程,要研究对策和措施。

(4)可否合作写一篇要上报刊的文章,指出信息网络与用户是一个"开放的复杂巨系统",对世界社会开放,是人造的。我们必须用"系统学"与"开放的复杂巨系统"理论来研究制定宏观调控的方案。在一个"开放的复杂巨系统"出现前就考虑其调控手段,这在历

史上还是第一次吧！这定会引起大家对“开放的复杂巨系统”的注意。

以上这些思想的前瞻性，在历史的发展过程中被证实了。一个时期以来，国内从事信息网络的一些专家们对上述思想有了较深刻的认识，以万维网(World Wide Web)所呈现出来的自组织等性质，对因特网(Internet)加用户是“一个开放的复杂巨系统”做了科学的论述；另外对用“系统学”与“开放的复杂巨系统”的理论对网络进行宏观调控的看法已受到有关方面的重视。20世纪末，钱学森的学生们在其学术思想的指导下提出的项目“支持宏观经济的决策从定性到定量的综合集成体系”，已经得到国家自然科学基金委的大力支持，并于1999年6月开始实施。他们充分利用网络技术，致力于把“从定性到定量的综合集成研讨厅”建立在Internet(因特网)的基础上，做到了研讨不受时间和空间的限制，使“研讨厅”实际上是一个“赛博空间”(Cyberspace)。这样的“研讨厅”就如钱学森所说的，是利用我们的现代科学技术体系的思想，综合古今中外上万亿个人类头脑的智慧！所以可以称之为“大成智慧工程”，而“大成智慧工程”的更高层次就是“大成智慧学”。

参考文献

1 钱学森等.论系统工程.湖南科学技术出版社,1982

2 钱学森主编.关于思维科学.上海:上海人民出版社,1986

3 赵光武主编.思维科学研究.北京:人民大学出版社,1999

作者简介：戴汝为 1932年12月出生。1955年毕业于北京大学。毕业后在科学院工作，现任中国科学院自动化研究所研究员。1991年当选为中国科学院院士。1980～1982年在美国普渡大学(Purdue University)电机系做访问学者。长期从事自动控制、模式识别、人工智能、智能控制及思维科学的研究。曾任国家“863计划”智能计算机主题专家组副组长，国际句法模式识别委员会委员，欧洲《Signal Processing》杂志海外编委，现任中国自动化学会理事长，中国科学院技术科学学部副主任、自动化所学术委员会主任，国务院学位委员会自动化学科评审组召集人，中国加拿大资源环境高技术中心专家委员会主任，清华大学智能系统与智能技术国家开放实验室学术委员会主任，《模式识别与人工智能》杂志主编等职。并受聘为清华大学计算机系、北京师范大学信息学院的兼职教授，以及中国科技大学、上海交通大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学等三十余所大学的名誉教授。已培养硕士生、博士生50余名。到目前为止，已发表《智能系统的综合集成》等学术专著5部，学术论文180余篇。近年来与著名科学家钱学森院士等合作，在某些前沿领域进行交叉学科的整合。先后获中科院自然科学一等奖1项(1992年)，航天工业总公司科技进步一等奖1项(1997年)，中国科学院科技进步二等奖2项(1986年、1990年)。负责主编的《智能自动化丛书》(共6册)获1999年国家图书奖。

春雨润物细无声

——记钱学森在信息领域方面对我的指导

汪成为

自20世纪80年代中期开始，我在钱学森的直接领导下进行工作，钱老以自己的言行，引导我为人、处事、作学问。信息技术是我所从事的科研工作的主要领域之一，也是钱老十分重视的一个领域。下面，仅就我自己的亲身经历，实录钱老在这个领域内对我的指导。

一、信息技术的战略意义——计算机软件也是文化

在1985年，我从事一个规模较大的软件工程项目，为此，经常向钱老汇报这个项目的进展情况和世界软件的发展趋势。在交谈中，钱老多次引导我深入思考国际上产生“软件危机”的原因、中文软件的特点，以及计算机软件对我国信息化建设的影响。

在钱老的启发下，于1986年初，我提出了一些观点，并写了《计算机与精神文明建设》一文。钱老肯定了这篇文章的基本观点，然后提炼出其中的部分内容，冠题为《电子计算机软件也是语言文字工作》，然后亲自推荐给光明日报社。1986年5月13日，在《光明日报》上发表了这篇短文。

文章发表后，钱老不止一次地指示我们，要从战略高度认识软件的重要性，尤其是中文信息处理将产生的深远影响。1994年钱老在《中文信息》上发表文章，又一次阐述了软件和语言文字的关系。

据我所知，自从20世纪60年代中期由美国国防部的高级研究计划署(ARPA)开始研制ARPAnet起，钱老就在多次谈话中提醒我们应对它的发展予以重视。尤其在1993年9月，美国政府发布了建设国家信息基础设施(National Information Infrastructure)的NII行动计划后，钱老曾多次把这方面的文章阅批给我们，指示我们开展对“信息高速公路计划”战略层面的研讨。

随着信息技术的迅猛发展和日益显示出它对社会发展的深刻影响，从20世纪80年代末开始，钱老多次指示我们应对世界历史上几次产业革命的发生、发展和影响进行深入分析。钱老说：“应站在历史演变和产业革命发展的高度来认识信息技术”。钱老还亲自领导了一个关于“第五次产业革命”的研究小组，通过研究讨论，大大加深了我对信息技术战略意义的认识。在钱老的指导下，我于1991年写了题为《信息属性劳动资料的增长是使科学技术成为第一生产力的重要原因》的学习总结。

钱老的这些教导和指示对我的帮助很大,使我在随后的“863”、“973”计划的信息领域的工作中,提高了应以战略高度处理信息领域各类问题的自觉性。

二、面向对象技术

钱老不仅仅从战略上重视计算机软件和网络文化的发展,他也十分关注计算机软件的某些具体技术的进展。他曾经向我们谈到他对世界“软件危机”成因的看法,他认为,计算机软件技术的根本目的应该是方便用户、缩小人和计算机之间的隔阂。在20世纪80年代中后期,当我们对Ada语言开展研究时,我曾向钱老汇报Ada语言的“基于对象”的特性,这本是一个十分抽象的问题,对于一位不是直接从事计算机软件、从事编译技术的人是一个很难理解的概念,但钱老却仔细地听、不时地问,直到搞清概念为止。

当我通过对Ada语言的认识和了解,进而熟悉了面向对象技术的概念、技术和应用前途后,我在1991年曾数次向钱老汇报面向对象技术的实质、效能和存在的问题。钱老仔细阅读了我送呈给他的技术资料,以及我所写的关于面向对象技术的文章和即将出版的(与其他同志合作的)《面向对象分析、设计和应用》一书的部分章节。

1992年11月4日,钱老给我写了一封信,信中肯定了我们对面向对象技术的本质认识后,进一步谈了他的认识:“这是一个思维学的问题,计算机软件在以前是完全按抽象(逻辑)思维建立起来的,但人的思维还有形象思维。所以要人机结合,我们一定要让计算机软件像人脑那样工作。日本第五代计算机之失败在于没有这种新软件。”

当国际上提出面向智能主体(Agent)后,我也曾向钱老汇报过我们的认识,钱老指示说:“问题的实质在于这些软件技术是否能更接近人的认识过程”。

三、信息挖掘和情报激活

自从我在钱老的直接领导下从事科研工作起,钱老最常谈到的就是“要重视情报资料的积累和分析”,“要善于从广泛的学术交流中吸取营养”,“尽量挤时间参加学术研讨会”。为此,钱老曾向我们讲述过许多生动的、他本人青年时代与此有关的故事。钱老曾亲自组织“系统学讨论班”,每两周一次,强调多学科交叉,钱老经常带头发言,老中青欢聚一堂,畅所欲言。从钱老的手稿和笔记中就可以了解到他对信息、资料、情报的科学态度和严谨的学风。每当我研读他的手稿、信件和笔记时,都产生一股催人奋进的力量。

在20世纪80年代初,钱老就提醒我们应重视国际上刚刚兴起的有关知识处理的动向,他曾不止一次地谈到当时的数据库技术。1983年7月2日,钱老发表了《科技情报工作的科学技术》一文,实际上已经相当深入地涉及到知识处理的许多实质问题了。

他说:“怎样从浩如烟海的资料库里面把情报提取出来,我们在这方面做的工作还不够。情报就是为了解决一个特定问题所需要的知识,一个它是知识,再有一个,它是特定的要求。……要注意它的及时性和针对性。”

他反复强调在知识处理过程中应“以人为本”,必须针对不同人、不同的要求。他说:“资料不是情报,情报是激活了的、活化了的知识。在技术上该如何做呢?第一,预测社会的发展,搜集和积累资料;第二,了解用户需求,与用户建立联系;第三,使用新技术,建立一个检索体系和检索系统;第四,针对具体用户提炼它所需的知识。”

他说:“如何把死资料变成活知识?提炼就是综合,需要一个框架、一个模型,在提炼的过程中需要‘系统辨识’,这就是生产情报的科学技术,是创造精神财富事业的很重要的一个方面。”

在那段时间内,我正参加某些模拟系统和决策支持系统的研制工作,通过实践,对钱老的这些指示有了进一步的认识。于是,在1993年1月写了《数据汇集和情报激活》一文,并在1993年国防科工委科技委年会上做了发言。钱老对我的文稿作了很重要的修改和批示。如:“在数据汇集的过程中要区分真假信息,这是很重要的一环”,“不同的用户有不同的需要,提出的问题也是不同的,不能用同样的一套数据汇集技术,所以数据汇集是低层次的概念,情报激活(信息激活)才是高层次的概念,它是为了人使用的,但搞得好,又的确能很有效地为人服务。”

四、人工智能技术

1986年初,我国的“863”计划即将正式启动,因此,什么是人工智能技术的实质,什么是智能计算机的发展方向,什么是我国智能计算机的技术途径等问题成为研讨的热点。

1981年10月,当日本向全世界公布研制第五代计算机的计划后,一时间,“五代机”成为信息领域的热门话题,成为世界计算机领域的研究方向和赶超目标。钱老十分重视跟踪和分析第五代计算机的进展,并在多个场合,十分鲜明地阐述了自己对人工智能技术和智能计算机的观点。例如:1985年5月26日,在全国第五代计算机学术研讨会开幕式上,钱老作了题为《我国智能机的发展战略问题》的发言,要点如下:

(1) 智能计算机不是巨型计算机。

(2) 18世纪末、19世纪初的工业革命的内容是机械化,20世纪70年代兴起的电子计算机化到21世纪的智能机化是人类文明的一个大发展。因此,这是科学技术发展的战略问题。

(3) 对智能机的研究不能一哄而起,必须把人工智能的理论和人工智能的实践结合起来,要做扎实的理论工作和实践工作。

1987年初,在我国的“863”计划信息领域内设立了“智能计算机主题”,相应地组织了智能计算机专家组,在国家科委领导下,专家组负责具体组织和开展对智能计算机的研制工作,这是一项光荣和艰巨的任务。当时,日本的五代机正“如日中天”,美国和欧洲也处于人工智能技术的高潮。而我国计算机技术的基础还很薄弱,信息领域的主要矛盾是如何加快信息基础设施的建设和信息应用技术普及的步伐,在此基础上,加速开展对人工智

能技术的理论研究和应用实践。如何制定我国智能计算机的发展战略,就成为专家组的当务之急了。

1987年12月15日,钱老应我们的邀请,出席了在清华大学召开的“863-306”专家组会议,与专家组全体成员交流他的观点,发表了“智能机技术是当今我国的尖端技术”的长篇谈话。他从科学技术的发展,尤其是信息技术战略发展高度,分析了人工智能技术对人类发展的影响,提出了“智能机是我们国家现阶段的尖端技术”。他分析了研制智能机的科学技术基础,提出11个方面的问题,即:人工智能(包括模式识别、专家系统等),脑科学,认知心理学,哲学,文学和诗词语言,科学方法学,社会思维学,模糊数学,并行运算,数理逻辑,系统学。

钱老还说:“以上我讲了这么多,归纳起来就一件事:智能的思维过程是一个并联的、多层次、多途径的网络,而且在一开始是模糊的,但是它不可能总是模糊的,而要从模糊到清楚。创造性的思维,在开始时是模糊的,到处搜索,但在思维的网络中,总有一点突然变得清晰了,模糊的概率分布突然变得很集中了,这就是创造,就是智慧,就是智能。”

最后钱老强调应重视战略分析,要有严密组织,他说:“当年打第一个尖端技术仗(指研制“两弹一星”)时,在座的各位中有人是作为年轻人参战的。现在你们都是中年人了,我相信,攻克智能机这个尖端技术的第二仗,是一定可以获得全胜的。”

从钱老的发言中,我们受到很大的鼓舞和启发,决定一方面要加强基础理论研究的工作,另一方面要对国际动态和国内的实际需求作深入的调研。于是,专家组对日本五代机、美国和欧洲的人工智能技术进行了深入的考察和研讨。然后,针对国内军民两个领域召开了多次调研会,并主动听取了有关各部委的意见。

专家组在完成了以上这些工作后,进行了较深入的战略研讨,群策群力,畅所欲言。最后制定了长远的和当前的战略目标,经国家科委批准后贯彻执行了。与此同时,于1991年2月18日,我也向钱老汇报了专家组的决定,以及我个人的一份学习汇报 ,题目是《什么是智能机系统以及对“863-306”第二阶段目标的思考》。两天后(2月20日),钱老在我的汇报上批了:“此件写得好,有中国特色了!”这是钱老对我们的鼓励。

在随后的近十年内,钱老一直关心着我国“863”计划信息领域和智能计算机的进展,我也不断地向他汇报自己的工作进展和学习心得。

在我从事“863”计划的十余年中,深深地感受到我国许许多多老科学家对我们的关怀和期望,“863”计划的成就不仅仅是出了些成果,更重要的通过计划的执行培养了一大批人才,所有这些成绩都是和老一代科学家的发起、倡导、组织和关心分不开的,老一代科学家的拳拳爱国情怀和严谨治学态度永远是我们的学习榜样。

五、虚拟现实技术

钱老最关心我国系统分析和仿真模拟技术的进展,在这个领域内,他的贡献是巨大

的。尤其是在1989年,他正式提出了从定性到定量的综合集成方法,这是将专家群体、数据和各种信息与计算机仿真有机地结合起来,把科学理论与人的经验知识结合起来,发挥综合集成的优势。我所从事和介入的几个模拟仿真系统,都是贯彻执行钱老这一指示所取得的结果。在这方面将由其他同志撰文予以介绍。在此,我只想谈谈钱老在推动我国开展虚拟现实技术方面的影响。

自20世纪80年代以来,钱老多次指出,在对复杂系统进行研究时,必须重视人和环境、人和机器的关系,而且应充分发挥人的能动作用。

1992年,我曾多次向钱老汇报了有关并行算法、自组织过程的建模以及人工生命等一系列问题。钱老于当年的8月12日的来信中,又一次地提醒我应重视对形象(直感)思维在计算机环境中的表述方法,应重视软件在这方面的作用。他说:“对于一时还没有搞清的问题,只有零星的概念,那抽象(逻辑)思维是无法下手的。这时要根据《实践论》,把感性认识的点点滴滴用一个软件把它‘缝’起来,如果计算的结果同实践的经验能对上号,那这个‘软件’就能用,范围只限于经验证过的范围。所以这个方法的每一步都离不开实践。……这就是人的作用,是人机结合。将来软件设计得更好了,步子可以迈得大一点,人的干预少一点,自动化程度就高一点了。”接着钱老又提醒我:“灵感(顿悟)思维与形象(直感)思维有许多相似之处。”以上这些话,对我从事多媒体技术以及后来对虚拟现实技术的研究都具有重要的指导作用。

为了进一步推动我国多媒体技术和虚拟现实技术的开展和应用,我在1992年11月2日写了题为《多媒体和灵境技术是建设定性到定量综合集成研讨厅的一个关键》一文(注:“灵境”即Virtual Reality,后经全国科学技术名词审定委员会的建议译为“虚拟现实”),钱老对这篇文章作了很重要的修改,又一次强调应重视人和系统的关系。

经过“863”等国家计划的努力,我国在CAD、图像处理、人机接口等方面已经逐步地取得一些可喜的成果了。各类仿真模拟系统也取得了实际的效益,同时也对计算和仿真结果的可视化和沉浸化提出了更高、更迫切的需求。在这种背景下,1994年9月20日,钱老在给我的来信中向我提出了新的要求。

他在信中说:“……现在您是否可以干另一件创造性的工作呢?即:

(1)计算机已在工程技术领域中从CAD到CIMS了,(能否)再发展到Virtual prototyping。

(2)现在计算机在科学领域中可以求解Quantum Chromo dynamics了,(能否)使数学家利用计算机搜索可能的复杂关系,并从显示屏幕上得到灵感,找到突破。

(3)在艺术领域中,计算机也应该有所作为吧?……应打开计算机艺术的大门,开辟一个新的艺术天地!”

当我阅读完钱老的这封信后,我意识到,这是钱老向我提出的新任务、新课题。经过了近两年的实践、探索和准备,1996年,我与高文、王行仁教授合作,撰写了《灵境技术的理论、实现和应用》一书。目的是企图“弥补计算机和用户之间的隔阂,建立一个和谐的人机环境”。当“人”和“机”相互配合得越“和谐”时,“人”的创造性就越能得到充分的发挥,

“机”的“善解人意”的智能程度也随之而提高了。虚拟现实系统不仅仅是对人所能够感知的时域和空域的放大,更重要的是虚拟现实系统提供了一种由外向里、由虚向实、虚实结合地进行科学探索的可能性。虚拟现实系统是我们想像力的倍增器,是促发我们创造性思维的发动机。

当前,我国的虚拟现实技术正处在“夯实基础,蓄势待发”的阶段,这是和钱老一贯提倡重视定性和定量知识的结合、重视建立和谐的人机关系密不可分的。对于我本人而言,是和钱老 1994 年 9 月 20 日那封下达任务的信密不可分的。

其实,钱老对我的指导和帮助,只是他对我们整个中青年一代的关心和指导的一个实例而已。可惜的是,由于我受自身各方面条件的所限,在许多方面离钱老的要求还差之甚远。

在我撰写这篇短文的过程中,我一次又一次地感受到钱老那深邃睿智的眼神、尖锐鲜明的论点、一丝不苟的手稿、提携后人的热忱对我们潜移默化的引导和影响。以上我所谈到的一些体会,只是对钱老爱国家、爱民族、爱科学、爱青年的精神品德的一个挂一漏万、很不生动的“形式化描述”而已。还是让我借用杜甫在公元 761 年的春天、在成都草堂中凝练而就的诗句,来描述钱老对我们中青年的关怀和指导吧:

“好雨知时节,当春乃发生。
随风潜入夜,润物细无声。”

作者简介:汪成为　1933 年出生。1956 年毕业于北京师范大学物理系;1956 ~ 1957 年在俄语学院留苏预备部学习。自 1957 年起在国防部第五研究院、航天部、国防科工委和总装备部从事模拟计算机、数字计算机、系统仿真、人工智能的研究工作。共主持或参与若干导弹型号的仿真模拟,十余种计算机、数种大型软件系统和智能化决策支持系统的研制,国防科技及武器系统发展战略研究以及其他预先研究课题。现任中国人民解放军总装备部科技委常任委员;中国工程院院士、研究员、博士生导师;国家“863”计划专家顾问组副组长;国家“973”计划专家顾问组成员;中科院计算机研究所兼职研究员;北京大学、清华大学、北京航空航天大学、南京大学、北京师范大学、国防科技大学、国防大学、解放军理工大学等兼职教授。曾获国家科技进步二等奖 2 次、三等奖 1 次,部委级科技进步一等奖 1 次、二等奖 3 次,“863”一等奖、何梁何利基金科学与技术进步奖(1998)等。已出版《面向对象的分析、设计和应用》、《灵境(虚拟现实)技术的理论、实现和应用》等专著,发表论文百余篇。

钱学森院士对发展地理科学的倡导

吴传钧

长期以来,钱学森院士以其崇高的学术地位,除了进行专业研究外,他还主持或参与解决了国家许多重大建设问题,从而高屋建瓴地对一些跨专业科学问题发表了不少创见,令人敬佩。1986年他在中国科协召开的天地生相互关系学术讨论会上就慧眼独具积极倡导建立地理科学,为祖国社会主义现代化建设服务,就是其中一例。关于这方面钱老发表的一系列论述包含了十分丰富的理论和他自己实践的结晶,已由浙江教育出版社于1994年集成《论地理科学》一书,引起了地学界的高度重视而广为传诵。在此,我略述学习该书的体会。

钱老认为地理科学是一门自然科学和社会科学汇合的综合性科学,它的研究对象是和人类最直接相关的那部分地球表层环境(或称地理系统),是一个复杂的、开放的巨系统,对人类的生存和社会的发展都有着密切的关系。

从系统科学来看,地球表层是个系统,它包含了非生物、生物和人,三部分之间有着相互制约和相互作用的关系。这个系统的范围上至对流层上层(平均距地表10km左右),下至岩石圈上层(陆地下5~6km,海底下4km)。这个系统随时间演化着,先是以无机过程为特点的自然地理系统(包括大气圈、水圈、岩石圈等),后又进化到以有机过程和生命过程为特点的生态系统(包括土壤圈和生物圈),最后进化到具有高级思维和意识活动的人类,并以社会形态出现的人类社会系统。这三个阶段逐步升级,一个比一个复杂,呈现出鲜明的层次结构和无机、有机和生命共有的特点。从物质形态看,有固态、液态和气态,三相互存,相互转化。

地理系统是开放的,它和外界进行物质和能量的交换。它接收来自太阳的辐射能,进入这个系统的地热能、潮汐能,还有来自外层空间的各种粒子流(如电磁波等)。由地理系统输出到宇宙空间的有同太阳辐射能大致相等的红外辐射,以及少量的轻质气体。

地球是人类活动的物质基础,而最终决定人类活动结果的是社会因素。地球表层的社会系统从地理系统输入物质和能量(当然也直接吸引太阳辐射能),经过加工处理、转换来满足人类自身发展的需要。同时社会系统也向地理系统输出物质和能量。这就涉及两大系统的关系问题,即人与自然的关系或人与环境的关系。在人类尚处于蒙昧时代,由于对自然界无知,人类只能被动适应于自然界,听任自然界摆布。当人类社会经过四次产业革命,科学技术有了很大进步,社会生产力有了很大发展,人类对自然界也由过去的被动适应变成了主动索取与局部征服。到了近年来科学技术飞速发展,生产力高度发达,人类

向自然界索取的物质和能量越来越多,而且越来越快。同时向地理系统输出的物质和能量(包括固、液、气)也越来越多,结果改变了地理系统的结构和正常功能,形成了对地理系统的污染,也改变了社会系统与地理系统的相互关联、制约和作用关系,影响和威胁着社会系统本身的生存与发展,其根源皆来自人类本身的活动。

今天科学技术已有很大发展,人类必须调整与自然环境的关系。应从地理系统整体的演化规律、系统组成各部分相互作用规律,特别要从人类活动对地理系统的相互影响出发,来处理社会系统和地理系统的关系,使它们相互协调发展,形成良性循环,实现环境优化,这是摆在人类面前的一项迫切的历史任务。地理科学正应该研究既涉及自然过程,又涉及社会过程的宏观规律和综合规律。

地理科学有一个体系,它可分为三个层次。一是最切实用的工程技术层次,这是干实活的,如城市规划、环境保护、水资源利用、天气预报、地震预报、地区发展战略等,也就是地理科学直接改造宏观世界的学问。二是带有理论性的应用层次,如数量地理学、生态经济学、国土经济学、城市学等。这一类学问是直接用来指导具体工作的,近年来也发展得比较快。三是较高的基础理论科学,就是尚待建立的地球表层学,即把人类在地球上进行活动的这个区域进行系统研究。此外,还有一个更高层次,即从实践上升到哲学。自然辩证法是自然科学的哲学,历史唯物主义是社会科学的哲学。地理学者必须学习马克思主义的哲学,以此来指导地理科学。

地理科学不仅是一门科学而是一个学科体系,它是与自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、文艺理论、军事科学、行为科学并列的现代科学技术中的一个大的科学部门,这是钱老对科学分类系统的崭新见解。他认为地理科学是自然科学和社会科学的交叉,是科学建设社会主义必需的理论。建立地理科学体系是社会发展的需要,也是为国家宏观决策发挥重要作用的需要,是符合现代科学综合化发展趋势的。钱老这些见解无疑对地理学的发展是一个强有力的推进。

地理科学的特点是地域性和综合性相结合,最好表现在地域性基础上的综合性。它的基础理论是以系统论的观点,着重研究地球表层人类活动与自然环境相互影响和反馈作用。它的中心研究课题虽然随着时代的进展而有所转化,但它的基础理论研究万变不离其宗,就是以研究人地关系地域系统为核心。具体地说,人地关系地域系统即在地球表层以一定的地域为基础的人地关系系统,也就是人类活动和自然环境两个系统交叉构成的相互联系、相互作用的一个复杂的开放巨系统。这一研究的中心目标是协调人地关系,重点研究系统内各要素的相互作用、系统的整体行为和调控机理。从空间结构、时间过程、组织序变、整体效应、协同互补等方面去认识和寻求一定地域的人地关系系统的整体优化、综合平衡及有效调控的机理。

协调地球表层人地系统需要通过自然科学、社会科学、工程技术、政府决策等多种途径进行调节与控制、优化与平衡,从而提高自然界的生产潜力和推进人与自然的协调关系,可以从以下几方面研究人地系统调控的机制:

(1) 应用系统论、耗散结构理论、自组织理论,分析人、地系统的整体结构与层次、系统的功能与方向,从而建立人地系统的模式。

(2) 应用区域分异理论、稳定性原理、突变理论、控制理论等,研究人地系统的非线性机制,非平衡条件下从无序到有序的维持,以及地球表层局部地区、区际、全球人地系统的可调节性,从而探讨人地关系的动态演变与规律。

(3) 人地系统的物质和能量的转换机制,首先要从人地系统的参数中选定数据。

(4) 建立人地系统研究的实验和监测手段。选定不同类型地区的人地系统,研究社会经济发展与自然环境的协调途径、措施,以及多种可供选择的调控模式与方案。

地理科学为社会主义建设服务,可充分发挥其地域性和综合性相结合的特点。钱老建议:一切和地理环境有关的建设可统称为地理建设,既有环境保护和生态建设,又有基础设施建设,具体说就是要由全社会来办的宏大的社会工程。地理建设可包括如下几个方面。

1. 资源系统建设

包括矿产资源、生物资源、农林资源等的开发利用和保护。目前我国资源开发利用方面存在的问题:资源勘查的技术水平低、开发程度低、开发利用的技术和工艺落后、综合开发利用的能力和水平低、经济效益低、资源保护差、浪费严重、再生资源的开发利用落后。

2. 能源系统建设

包括城镇供电、供水、供气建设。目前能源分布不均衡、结构不合理,以煤为主的资源利用率低、污染严重、运输紧张。一次能源转化为二次能源的比例低、单位产值的耗能高,农村主要以柴薪秸秆为能源,破坏植被和生态平衡,形成水土流失。

3. 土地利用与整治工程建设

我国人多地少,土地资源十分紧缺,目前土地利用中乱占、浪费和污染问题严重。加强基本农田保护、中低产田改造、土地整理与土地复垦、退化土地生态恢复工程建设,促进土地利用优化配置与可持续利用。

4. 水资源保护与水利工程建设

我国水资源地区差异大,北方和沿海城市缺水、超量开采地下水、海水倒灌。应加强水利工程建设,提高水资源的开发利用率。

5. 环境保护及绿化建设

土壤盐碱化、沙漠化,农业污染广泛,水质污染严重,城市污染,森林缩减,草原退化,非抓紧认真保护不可。

6. 灾害预报和防治

包括气象预报、防灾抗灾。我国经常蒙受多种自然灾害,损失巨大。

7. 城镇及居民点体系建设

城市环境质量差,基础设施落后,城乡居住条件差,建筑工程质量差,管理体制不合

理,缺乏科学的总体规划。

8. 人口控制

要建设社会主义物质、精神、文化三个文明,首先要把基础条件搞好,否则持续稳定与协调发展就难办。

地球是个物质基础,人在地球上活动,最终决定人类活动结果的还是社会的因素,所以地理建设与社会制度有很重要的关系。我国地理建设落后的原因是多方面的,例如资金、人力、物力、科技投入不够,管理制度不合理,运行机制不协调。过去经济发展过于注重速度和产值,结果形成了高消耗低效应的粗放经济,基本上走的是外延扩大再生产的道路,而不是内涵扩大再生产的道路,这一点必须有所警觉。

地理建设的内容涉及社会系统和地理系统,需要社会科学和自然科学的支持。地理建设就是为了使地理系统和社会系统协调发展而进行的人类活动。我国社会主义地理建设的任务和目标,应使地理系统既能为社会主义文明建设持续稳定发展提供物质基础,同时又要利用社会主义物质文明和精神文明建设的成就来加强地理建设,两者相互促进、协调发展,达到环境优化的目的。

地理科学和社会主义精神文明建设有关,也是文化建设的重要方面。在国民教育中,地理科学教育只能加强不能削弱。在今天全球一体化发展的世界里,作为一个公民如果对这个世界一点概念也没有,那这个公民是当不好的。说到底各级学校中的地理课程是实施爱国主义教育的一条必不可少的渠道,也是十分有效的途径。

钱老一再强调研究地理科学要讲究方法,要处理好国家地理建设这类如此复杂的问题,必须采用从定性到定量二者相结合的集成方法,才能避免片面性。

1989年,钱老向中国科协书记处刘恕同志作口头和书面建议:“地理科学对社会主义建设来说,是一门迫切需要的科学。我所说的地理科学是指自然科学与社会科学交叉,是科学建设社会主义所必要的理论。我国在社会主义建设过程中提出的问题很多,如资源利用、国土整治、发展战略等都涉及地理科学……我们要把地理科学的概念完善起来,使地理科学在国家中长期规划中起到作用,我们就算做了件大事……为了社会主义建设,我们要组织力量,统一思想,理直气壮地建立地理科学,中国科协也要为此事做工作”。钱老的谆谆叮咛,对全国地理工作者是极大的激励。

钱老建立地理科学的思想,是对全球性、区域性高度研究这一世界科学潮流做出的积极反应,是走具有中国特色的科学发展道路的一个实际步骤。地理科学的建立和完善,不仅对我国科学事业是一大促进,也将对我国摆脱目前由于不注意人地关系的协调而形成的种种困境起到积极作用。我国的地理学在世纪之交正面临着实用化、理论化和技术化等多方面的挑战,地理工作者应响应钱老的号召,通过积极参与国家地理建设,加强人地关系的研究,尽快改变自然地理学和人文地理学貌合神离的局面,充分发挥区域综合研究优势,寻找地理学新的生长点和新的突破点,为建立和完善地理科学做出应有的贡献。

作者简介:吴传钧 1918年4月2日出生,江苏省苏州人。1941年前中央大学地理系毕业。1943年获硕士学位,1948年获得英国利物浦大学博士学位。1950年参加中国科学院地理研究所工作至今,曾担任过副所长。1981~1983年担任联合国大学顾问。1988~1996年担任国际地理联合会副会长。1991~1999年担任中国地理学会理事长,现为名誉理事长。1991年当选中国科学院院士。曾获国家科技进步一等奖2项,中国科学院科技进步一等奖3项,1991年获中国科协周培源国际科技交流大奖。发表中英文论文200多篇,专著20多部。

对钱学森沙产业理论的学习和理解

刘　恕

1984年,我国杰出贡献科学家钱学森先生在学术会议上,提出“创建农业型知识密集型产业——农业、林业、海业、沙业”。在以后的十多年里,他又通过多次的通信、演讲以及书面文字和口头解说,对“沙产业”(Deserticulture)做了多方阐述,形成了钱学森关于沙漠戈壁合理利用的科学构想。沙产业既是新的科学术语,又是一个表达简洁而又有严格规范的沙漠开发利用战略构架。它包含了开发利用的目标和达到目标的系列规范,是一种新思维。

十多年来,西北沙区群众和干部欢迎沙产业理论,认为“改变了对沙漠戈壁的认识与态度,有震古烁今、新人耳目、发人深思、催人奋进”的意义。今天,在纪念钱老九十华诞的日子里,学习和理解钱老的沙产业理论,将会更加振奋精神,在开发大西北、对抗土地荒漠化的伟大事业中,坚定必胜的信心和信念。

一、沙产业——“不毛之地”上的现代农业

钱老所倡导的沙产业是农业型的产业,农业型产业是以光合作用进行生产的体系。钱老在多次论述中认为,沙产业是知识密集型的农业型产业;实现沙产业必须是利用全部现代科学技术,包括物理、化学、生物学等基础科学,通过植物的光合作用转化太阳能;利用系统工程综合开发产品和产后加工;建立适合市场机制的有效管理体系。只有这样才能在我国150万 km^2 的沙漠、戈壁和沙漠化土地上,创建能“为国家提供上千亿元产值的沙产业”,“为人类开拓新的食品来源”。他认为:沙产业就是变不毛之地为沃土。他期望沙产业以及其他知识密集型农业型产业的建成将是一次新的产业革命。

众所周知,在地球南北回归线附近的陆地表面,除个别受高山影响的地块外,分布着面积辽阔、干旱少雨的荒漠和半荒漠,占地球陆地近1/3。这些沙质荒漠、砾质戈壁和土质“光板地”,植被稀疏,第一性生产力低下,被人们称为“不毛之地”。仅非洲的撒哈拉、亚洲的阿拉伯半岛、澳大利亚的维多利亚,就占据了世界陆地的1/10。中国北方沙漠、戈壁共计130万 km^2。这大片国土上,人烟稀少,除岛屿般散布的绿洲和天然草场外,均为沙丘和砾石所覆盖。被称为“不毛之地”的干旱、半干旱区,大气干燥,多风少雨,自然地理条件非常严峻。因此,居住在这里的群众自古以来经济活动和谋生手段都有别于其他地方。在中国、在全世界,这些地方多属于贫穷、不发达地区,是产生“生态难民”的根源地。在20世纪中除了两次世界大战给人类造成了巨大的浩劫外,最悲惨的、人口死亡最多的“旱灾”

(非洲的“萨赫勒灾变”、中国“民国十八年大旱”),都发生在这些荒漠、半荒漠地区。特别是由于人口快速增长,加大了社会需求,破坏了干旱、半干旱地区农牧开发中传统技术的合理性,产生了诸如滥垦、过牧、大面积樵采等导致土地沙漠化的直接人为因素。以致近30年来,世界上干旱、半干旱地区不同民族的农牧民在实践中都总结出同一条教训:“耕地多了,但产量少了;水多了,但草少了;羊多了,但肉少了”。干旱、半干旱地区人类不合理的开发活动,导致了对第一性生产力即植物光合作用物质基础的丧失。不节制的滥用,不仅是对资源的掠夺,而且是对生产力潜能的破坏。土地沙漠化(有的称荒漠化,涵义略有区别)被称为当代环境问题之首。原因是土地沙漠化涉及面广,又不易治理。干旱、半干旱地区的经济开发活动,单纯依靠传统的方式和技术,已被实践证明是和持续发展背道而驰的。目前,正面临着谋求新思维的抉择。当人们需要一种沙漠开发利用的正确指导方略的时候,钱老在1984年适时地提出了“沙产业”理论。

二、沙产业的发展谋略定位于提高对太阳能的利用

在“不毛之地”上进行农业生产,要求人们对沙漠戈壁(特别是临近绿洲分布的沙漠戈壁)的认识上要有认识上的飞跃。沙漠戈壁就其本质难以成为土地资源且风起沙扬造成危害。但是如赋予其一定的人为设施条件,克服其干旱、风沙条件,充分用其阳光充沛的无可比拟的优势,“不毛之地”可成为沃土。地球表层的自然界是人类赖以生存的物质基础。地球表层的万象更迭和生命活动的不息运转,最大的动力来源是太阳能。

钱学森院士倡导的沙产业,将目光转向沙漠地区分布在地球表面赤道南北一定范围内的阳光地带这一现实,把提高这里的太阳能同化效率作为开发方向。沙漠戈壁地区云层稀少,全年日照时数在2 800~3 300小时之间,充沛的阳光是天赋资源。例如,我国国土太阳能年辐射总量在80~200kcal/cm^2(1cal=4.1868J)之间;而内蒙古、宁夏、甘肃的西北部及新疆的东南部年总辐射量均在140kcal/cm^{2}以上。沙产业发展谋略定势于提高植物的太阳能转化效率,立足于充分利用沙漠地区天赋阳光资源,提高单位面积碳水化合物的产出量,从而满足于人们对氨基酸、维生素、生物能源及工业原料的需求。沙产业这一谋略定势,从根本上有别于几十年来沙漠开发利用总体目标的认定。

农业种植生产活动的实质就是利用光合作用固定和转化太阳能。在单位受光面积上最大限度地固定太阳能,就是农事活动的最高目标。在一个地块上,一年之中,收一茬和通过套种收两茬,后者就比前者多利用了太阳能。北方大部分地区无霜期仅为120~160天,大田作物不能利用冬季里过半时日的阳光。如果用透光的塑料膜做一个大棚,就能在冬季变农闲为农忙,使这块土地上的太阳能更多地被固定下来。中国西北干旱、半干旱地区,即内蒙古西部、宁夏北部、甘肃西北部、新疆东南部的太阳能辐射总量是一笔巨额的财富,充沛的阳光“取之无禁,用之不竭”(苏轼语)。可见,地球上人口大量增加,食品不足成为当代困扰人类的难题。究其原因,不是阳光不够,不是能的源头不充沛,而是地球表层

固定转化太阳光的功能弱，或者破坏了这个转化系统，或者由于种种原因降低了这个转化系统的转化功能。解决人类难题的努力在于运用科学知识，特别是最新的知识，来固定转化太阳能。目标就是要想尽一切办法，通过光合作用，把最大量的太阳能贮备起来，开发出一个新时代、新纪元，把产业活动内容限定为用光合作用固定太阳能。这样，不但追本求源，指明了充分利用“取之无禁、用之不竭”的普惠阳光这个人类经济活动最重要、最基础、最有伟大前景的目标，而且确定了固定太阳能的工具是附着在生命活体上的叶绿体。它的结构最灵巧、功能最神奇，有不可取代的高效率，又可以依靠自然的生命力自我更新、自我复制。这就端正了人类在沙漠地区经济活动的主要方向。

三、充分运用现代化技术是沙产业的内核

钱学森的沙产业理论，基于对地球表层客体的深刻认识，把提高太阳光的利用率的最大潜力和努力方向寄托在高新技术的运用上，主张走出传统，跨行业、跨领域地运用物理的、化学的科学原理，运用信息革命的成果、新工艺、新材料、新技术，创造植物光合作用的条件，最大限度地利用太阳能。

沙漠地区的太阳辐射虽然全年之内都是充沛的，但植物赖以生存的条件却异常严酷。无论依靠天然的植被还是人工植被，都难以达到高效地固定转化太阳能的目标。这是因为太阳能转化器——绿色植物的生长，需要相应的积温、肥沃的土壤、足够的水源；沙漠地区植物生长的自然条件极不稳定，变幅异常剧烈。《简明不列颠百科全书》对荒漠(Desert)的诠释中写到：“荒漠的自然生产力比大多数生态系低，植物靠水，而其他有机体依赖植物，这就意味着干旱条件限制了干旱区的辐射、温度和其他生长因素，否则能获得地球上最高水平的生产力”。

局限于沙漠自然条件的传统农业型生产，不会造就光合产量的飞跃。沙产业倡导利用现代化技术、新材料、新工艺，人工改善植物固定、转化太阳能的生境，就会极大地提高光合作用的效率。例如，用温室改变光热条件就能摆脱不良气候的影响和季节的束缚；降低蒸腾和蒸发，就可以极大地节约水的无效消耗；增加 CO_2 的浓度，就能提高光合作用的产量；改善光照质量和采用人工光源能加速作物的生长发育，等等。新技术革命的成果开辟了广泛的可能，但技术上的可能不等于经济上合算。从目前的实际出发，应选择那些已有基础、易见成效、推广容易的技术，作为沙产业创建的新起点，例如塑料膜(地下敷膜保水保肥，地表敷膜减少蒸发等)和温室技术的应用，滴灌、渗灌配套设施的推广等等。用生物基因工程改良太阳能生物转化器，用人工种子繁衍良种，都有良好的前景。在我国已被广泛掌握的立体种植、组织培养等农艺手段，在沙产业的集约经营中收到立竿见影的实效。

1998 年 4 月 11 日、9 月 5 日钱老给笔者的信中认为：“沙产业的一套做法实际是高科技农业生产的试验”，“沙产业实际上是未来农业，高科技农业，服务于未来世界的农业！”

为方便生产者把握技术要义，沙产业技术路线的通俗表述为多采光，少用火，新技术，高效益。天赐的阳光是地球表层生态系统的能源，光合作用是这个巨系统能源的“入口”，把万象之源的能量最大限度地采收下来，就是沙产业的要义。合理利用天然降水和降水变成的径流以及渗入地层的地下水，是在沙漠地区求发展的关键技术。新材料、新技术、新工艺，包涵了当代科学技术和技术的进步，这些知识的投入，能摆脱传统农业对生产力的束缚。沙产业是知识密集型的大农业。没有高新技术的应用，沙产业就失去了生命力。高效益是一个综合的也是最终的评价沙产业的经济指标，这是创建沙产业的出发点也是最终的归宿。

目前推动沙产业的措施办法，是用新材料构筑一个能起隔离作用的膜或壳。这种薄膜或介壳，有很好的阳光通透性能，且不利于水、热的逃逸散失。种植地的地膜覆盖和设施保护地的塑料大棚，都是这种膜壳作用的形态。正是由于这种措施改变了水热交换的原始状态，起到了多采光、少用水的效果。

进行光合作用的主体植物种或品种优选，也是一个重要的方面。今后，理想的太阳能转化物可能是一些适合用工业化连续生产的绿色植物。例如不仅是种植在田间，而是养殖在循环流动的管道之中的藻类等。

四、逐渐形成市场机制引导下的有效管理，是沙产业健康发展的关键

沙产业的创建和形成，将是一个不断完善的过程。这个过程可体现为若干阶段。因而，在初始阶段，不应该把近期的目标和可能的发展远景相提并论。这是因为在技术飞速发展的今天，有深厚自然科学知识水平和聪明智力的科学家，善于集合物理学、化学、生物学等有关最新进展的精华，再加上很好的想像力和创新活力，沿着钱老指引的方向，可以把沙产业的远景勾画得五光十色。但是，我们选择了用产业来导引学术发展的道路，就必须把现实性和可操作性放在首位，把现在的立足地作为出发点。这样，一种追求实效的产业管理策略就是健康发展的关键。它包括产业现代化管理的一切内容、核算、经营机制、产品质量、商业运营等。钱老希望沙产业发展成为沙区大农业。实践之初是以小规模、集约经营以及选好龙头技术、做好示范基地、选准优先项目为突破口。

五、寓环境保护于经济开发之中，取得生态与经济双效益才是沙产业赖以发展的内在保障

近百年来，人们在干旱、半干旱区的农业开发活动中，无视自然条件的特殊性，以致多次在“征服自然”夺得丰收的喜悦后，却迎来了大自然的“报复”。加拿大、美国被开垦的草原上发生的黑风暴，曾迫使开发移民的大迁移和成批农场废弃。赫鲁晓夫的垦荒运动有过戏剧性的大起大落。土地荒漠化问题的科研结论告诉我们，导致环境退化多半通过风

力和水力两个动因。强劲的天然风力引起土壤风蚀,人工灌溉导致土壤次生盐渍化。上述动因引起了土壤的肥力丧失。早在20世纪初,美国学者凯依斯对植被破坏引起的土壤风蚀有过生动的描述。他认为风力引起的“尘暴或沙暴,扮演着河流冲刷土壤同样的角色。但和大河相比,这个巨大的怪物把大量的沉积物裹胁在大气之中,宽300~500km,而不是像大河那样2~3km。它的时速达60km,而不像河流那样时速仅2~10km。它搬运走千百倍多的粉碎的物质。”土壤风蚀对肥力破坏的道理容易认识,但人们却受垦殖草原眼前利益的驱使,放松警觉,在20世纪一再重犯同样的错误。干旱区依靠现代化的技术使供水缓解,往往使人们不再珍惜用水;大水漫灌和强度蒸发的次生盐渍化,使世界上每年丧失约1/10的水浇地。

历史已跨入21世纪。今天,爱护地球、保护环境被视为人类共同的道德准绳;留下经济繁荣和青山秀水的环境给后代子孙,已成为当代人的神圣职责。从环境保护、防治荒漠化的角度出发,发展沙产业是控制荒漠化的积极手段。其一,由于沙产业应用现代农业措施,以设施农业替代大田耕作,设置薄膜介壳成为良好风蚀保护层,抗御由耕种引起土壤风蚀。其二,因为沙产业会增加沙区光合作用的产品产量,第一性产品产出量愈丰富,人们为追求生活必需而进行的盲目开发行为才能得到控制,沙区的植物资源方能得到休养生息,持续发展的原则才能得到具体体现。

六、沙产业理论为人类开辟新的生存空间

当前,世界人口进入了快速增长的阶段。世界银行的一个研究报告估计,人口在未来的增加,将集中在目前缺吃少穿的贫困地区。目前,全球每增加10亿人口只需要10多年时间(公元元年世界人口1.5亿;1550年增加到4.5亿;1850年达到10亿。世界人口由10亿增加到1930年的20亿用了80年时间;由20亿增加到1962年的30亿仅用了32年。1975年,世界人口达到40亿。1987年,世界人口50亿,1999年已达到60亿)。2000年的2月16日,联合国粮农组织在罗马公开了一份报告,其中说到,包括发展中国家的2亿儿童在内,全球约7.9亿人口食不果腹。33个国家粮食极度匮乏,其中13个地处非洲,埃塞俄比亚有800万人情况危急。有数以亿计的人挣扎于食品匮乏和卫生条件恶劣环境之中,可见保障人类粮食及食品需求任务仍十分艰巨。1996年11月,在罗马召开了首届以粮食为主题的首脑会议。会议通过了《世界粮食安全罗马宣言》和《世界粮食首脑会议行动计划》,呼吁各国确保全国持久的粮食安全。实际上,为维持人体生存所需热量和生命元素,主要是通过植物光合作用转化太阳能而来。太阳能是生命之源。在1996年召开的科学家高级会议马德里宣言中,农业被称为是“当今世界最广泛利用太阳能行业”。幅员辽阔的干旱、半干旱地区占地球总面积10%,占非洲总面积55%,北美和中美洲19%,南美10%,欧洲2%,大洋洲35%,亚洲34%。由于其充沛的日光辐射,有可能造就极高的植物生产力,必然成为提供人类所需粮食、食品的新空间。

在这种背景下，钱老关于在干旱、半干旱地区的不毛之地创建知识密集型农业的科学构想用来满足人类的食品需求，就具有远瞻性的导向作用和全局性的战略意义。

1994 年 9 月，在纪念钱学森沙产业理论 10 周年学术研讨会上，与会的同志有一个看法：钱学森沙产业理论作为一种跨世纪的沙漠利用战略构想，为我们指明了方向，但沙产业的真正价值如不在生产中得以体现，人们依然难以正确估价它的意义所在。有鉴于此，会议上提出："向沙漠戈壁各地政府，向政府有关部门，向一切关心沙区环境和人民的有识之士呼吁，通过你们的力量统筹已有的资金渠道，筹措一批中长期贷款，扶持建立沙产业专业公司，按照自负盈亏、自我发展的原则，重点发展沙产业龙头技术和带头产业，像滴灌设备公司、温室技术及设备公司、藻类产业公司等，并以点带面，推动发展。首先选择甘肃河西、内蒙古、新疆等地建立试点、示范基地，使以提高太阳能转化效率、节约用水为目的的沙产业能与其他产业处于同等竞争地位。"从 1994 年开始，仅仅过了不到 5 年的时间，这些目标，就已变成和正在变成了活生生的现实。

曾经长期在西北工作，至今仍关心沙区人民生活的宋平同志，在 1995 年 11 月 30 日，亲自视察河西后提出"要认真重视沙产业"，"坚决走这条路子。"温家宝同志在 1995 年 11 月批示中指出："办好这件事不但有经济意义，而且有社会和生态意义。"姜春云同志在 1997 年 3 月，在农业发展银行关于支持沙产业建议书上批示："抓得好，支持沙产业意义重大，也大有可为，应加大工作力度，以取得更大成效。"甘肃省委、省政府以及内蒙古自治区的领导同志都撰文支持沙产业。东起科尔沁沙地，西至天山南北，发展沙产业建设新型绿洲经济，已成为振兴当地经济的指导方略。

在甘肃张掖地区，共建立了 13 个沙产业综合开发示范区，地膜和保护地栽培近 100 万亩($1hm^2=15$ 亩)，其中日光温室、塑料大棚 3.83 万亩。山丹县沿 312 国道，在不毛的戈壁滩上建成 235 座大棚，其中有 50 座实行无土栽培。该县东乐乡在戈壁滩上，1997 年建设的雨水汇流工程，利用暴雨径流发展沙产业，并建成半地下温室 300 座，变戈壁为绿洲，使不毛之地变成沃土。充分体现"多采光、少用水、新技术、高效益"的沙产业技术路线。在河西张掖，沙产业示范基地作用，还体现在日光暖棚工厂化养猪、舍饲养羊，以及年产微藻干粉 10t 的生产基地。特别是引进以色列电脑控制的全自动化温室 4 600m^2，滴灌、渗灌、微喷等各类节约用水设施示范区近 200 亩。14 个脱水蔬菜厂和现代化的猪厂，按照龙头带基地、基地连农户的形式，贸、工、农一体化经营。民乐县在戈壁滩上，按照"推良种，用良法，多采光，少用水，深加工，上规模，上水平"的方针，连片开发，规模经营。甘肃张掖地区，在地委、行署的统一指挥部署下，沙产业已蓬勃发展起来。在甘肃河西走廊的武威、酒泉、敦煌及内蒙古自治区哲里木盟、赤峰市都涌现出生动的具有示范意义的沙产业典型。"绿起来，活起来，富起来"这种生动形象，表述沙区群众建设沙产业决心和步骤的口号已经在不少地方得到实现。1996 年 12 月 2 日，钱老在给笔者的信中说："今后工作我想还应在实践，发展沙产业，有了人人看得到的成绩才好宣传说服人。"。

推进沙产业——不毛之地的农业现代化开发活动，其重大意义和作用，不言而喻。对

此,国际上一些专家学者和政治家也有类似或雷同的看法和言论。印度总理拉奥(1994 年 5 月 23 日)在新德里召开的一次国际会议(受联合国和世界银行支持的国际农业研究咨询组织会议)上致开幕词时说:“像印度这样的穷国(约有 70%的人口靠农业为生)必须要找到开发那些不毛之地的新方法。”“从干旱到洪涝,或者贫瘠的盐碱地,这些都是一般性方法所不能解决的。”

经过最近几年的实践,更多的人已经认识到发展沙产业是防治土地沙漠化的根本措施,是沙区人民群众脱贫致富的突破口,是缩小东西部经济发展差距的捷径,也是把干旱、半干旱区的大农业提高到现代水平的一条道路。我们充满信心,在党中央、国务院的领导下,大西北的明天,一定会建设成一个现代化农业文明和安定繁荣的边疆。

参考文献

1 钱学森.发展沙产业大有可为.见:沙产业——跨世纪的沙漠利用战略构想.北京:中国环境科学出版社,1996

2 简明不列颠百科全书.北京:中国大百科全书出版社,1985

3 刘恕.沙产业——跨世纪的沙漠利用战略构想.科技导报,1994(11)

4 刘恕主编.步入实践的沙产业.北京:中国环境出版社,1998

5 刘恕主编.纪念钱学森建立沙产业理论十周年文集.北京:中国科学技术出版社,1995

作者简介:刘恕　研究员。1960 年毕业于苏联列宁格勒林业工程学院。1960 ~ 1983 年先后在中国科学院治沙队、兰州沙漠研究所从事研究工作。1983 年后两次被甘肃省人民代表大会选为甘肃省第六届和第七届人民政府副省长。1989 年 6 月调至中国科学技术协会工作,任书记处书记、常委、副主席等职务。是第八、九届全国政协委员,兼任全国政协文史委员会副主任、中俄友好协会常务副会长、中华环保基金会副理事长等职务。沙漠化及其控制领域研究的开拓带头人之一,对沙漠化成因、沙漠化的整治原则及措施以及在理论上揭示出沙漠化的生态学原理做出了贡献。近年在总结沙漠开发得失及对资源特征深入认识基础上,着力推动发展沙产业。多年的研究及实践使其成为沙漠及沙漠化防治的资深专家。

21 世纪中国可持续发展新战略

——钱学森创导知识密集型草产业的科学贡献

李毓堂

一、前　言

草地是可更新资源，是人类生存和发展的基本物质条件。草地的科学管理开发是现代社会经济和文明环境的基础。我国有 3 亿 hm^2、位居世界第二、占国土 41%的草地资源，但草地生产力比世界发达国家落后半个世纪以上。如用现代机械、化工、信息、生物等科技开发其潜力，则在国家面临人口增加、耕地减少、生态环境恶化、东西部发展差距加大趋势下，将对未来中国人口、资源、环境、富裕、西部少数民族经济可持续发展起决定性作用。国家杰出贡献科学家钱学森正是在这一形势下，以其博深的科学观、敏锐的洞察力和执著的求真精神，分析国情，调查研究，于 20 世纪 80 年代中叶首次提出创建知识密集型草产业理论及实践的具体主张，并同草业界人士建立了切磋求索的"道义之交"(钱老语)。此后，在全国建立草地管理建设十大基础体系、20 多个省(区)40 多个草地牧业综合开发示范点、草业科技发展和重大学术活动中，都得到钱老的关注、鼓励和指导。15 年来钱老通过谈话和 30 多件信函，或赐教、或评论、或倡导，深入地论述了草产业的理论、内涵、科技、机制、管理及前景预测等思想，殷切地鼓舞草业工作者排难奋进。还为此多次向中央上书，呼吁成立国家级草地管理机构。钱老精辟的草业论述，不仅创导了我国草产业科学，开拓了草地资源优化开发管理和 21 世纪可持续发展的光辉途径，还对世界草地资源科学做出划时代的贡献。

二、钱学森创导知识密集型草产业的背景

(一)世界发达国家经济与生态发展规律表明，优化管理开发草地资源是现代社会经济和环境优化的基础

(1)草地是人类生存和发展的基本土地资源。全世界草地面积约占地球陆地面积的 51%(其中：天然草地占 24%、疏林草地占 16%、农田草地占 11%)。世界上除森林以外的农用土地中，草地占 70%。在地球上以太阳能转变为生物能的绿色植物中，草是种类最多、适应性最强、覆盖面最大、周转速度最快的可更新资源。草地还是依存其上的动植物，微生物，矿物，风、光、水、气能源，自然和历史文化遗产，旅游等各类共生资源的载体。因

而，草地和耕地、林地一样，是构成人类社会经济发展和生态环境条件的物质基础，也是生物多样性的天然园地。

(2)世界文明发展史表明，人类从游猎经济时代进入游牧经济时代，主要依赖于对天然草地的利用。进入农耕时代后，天然草地利用和畜牧业经济仍在农业中占有重要地位。

(3)20世纪以来，欧洲、北美、澳州等地区的经济发达国家通过对本国草地资源的优化开发管理，使草地生产力达到先进水平。实现了农业结构和国民吃、穿、用结构的转变以及城乡土地的绿化（“黄土不露天”），从而奠定了现代经济和生态环境优化的基础。

(4)1992年3月，联合国粮农组织为解决世界粮食紧缺问题，向各国政府发出号召，建议把开发草地资源发展反刍动物作为保障世界粮食安全的战略措施。

(二)中国草地资源优化管理开发在中国经济、生态、社会持续发展中的战略地位

(1)中国草地资源是中国国土资源的重要组成部分，在除林地以外的农用土地中占75%。其中牧区3亿hm^2，农区草山草坡8 700万hm^2，滩涂草地1 333万hm^2。草地类型之多和天然牧草品种之富都居世界首位。各种牧草各有适应不同环境气候条件生长的特性，是开发生物工程技术的宝贵基因库。同时，草地上还分布有丰富的珍稀野生动植物、优良家畜品种、风能、太阳能、天然气、地热、水资源、各种矿藏、奇特地质地貌等自然文化遗产和名胜古迹等历史文化遗产，以及民族风情等人文资源，用以发展高科技高效益综合经济，潜力极大。这是我国生存资源中不可缺少的基本要素。

(2)中国草地是中华各民族先民生存发展创造文明历史的摇篮，也是现代社会经济发展和生态建设的重要基地，也是构成我国现实生存资源禀赋的一大基本要素。仅以十省(区)牧区草原统计，20世纪90年代初共有266个牧业、半牧业县，人口4 000多万人，饲养草食家畜1亿多头(只)(其中大畜2 700多万头，小畜7 700多万只)，年产牛肉、羊肉、羊毛、羊绒、奶类分别占全国总产量的25%、29.6%、52.7%、70%和28.2%，在全国牧业总产值中占有重要地位。

(3)由于我国草地是国土生态环境空间的重要组成部分，又由于牧草(草坪)是防风固沙、保持水土、净化空气的主要地被植物，而豆科牧草又有根瘤固氮改良土壤的特殊功能，在高寒、干旱条件下比林木有更强的绿化功能，因此草地生态和植草绿化又是构成国土生态环境现状和未来生态建设的基本要素。

(三)我国草地资源优化管理开发落后给经济、生态、社会发展带来的负面影响

1. 由于社会历史的原因,目前我国草地资源优化管理开发水平比世界经济发达国家落后半个世纪以上

20世纪30年代以后,世界经济发达国家在社会发展战略、机构设置、投资预算和科教事业发展中把草地资源的优化管理开发摆上重要位置。在观念上,把草地和优良牧草看做是“绿色黄金”(英)、“上帝恩赐之物”(法)、“立国之本”(新)、“绿色银行”(美)等。通过严格执法,围栏化保护、合理利用,不断改良和大力兴建人工草场(占到草地总面积的30%~80%),使草地生态和生产力达到一定优化水平。

我国受传统观念影响,一直轻草贱草,缺乏草的科学观念,更无钱老讲的“知识密集型草产业”的观念,不把我国拥有世界第二的草地资源看做是“宝”。在国家发展战略、机构设置、投资预算及科教事业发展中,没有把优化管理开发草地资源摆上位置。至今我国没有国家级的草地管理机构和执法队伍。建国以来草原方针多变,几次草原大开荒,开垦破坏草原二三千万 hm^2,形成“头年开了荒,二年打点粮,三年变沙荒”;加上草原经营体制上长期“吃大锅饭”,人们只利用不建设,超载过牧,因而导致80%以上草原严重退化、沙化,产草量近30年来下降50%~70%。而草原建设上,50年来 $1hm^2$ 草原平均每年投入不到0.45元。全国目前草地围栏和人工草地面积不到总面积的2%。本来,我国草地自然生产力水平同发达国家同类草地自然生产力水平是相等的。然而,发达国家经科学管理建设使草地生产力达到优化;而我国却由于管理建设不善,使草地生产力严重退化,每公顷草地畜产品产量仅相当美国的1/20、新西兰的1/80。反过来一些人还把草地看做是荒凉不毛之地。

2. 草地资源管理建设不善

草地资源管理建设不善,直接造成牧区畜牧业经济和南方草山区经济长期处于增长速度慢、生产水平低、发展不稳定的状况。由于草地生态破坏,抗逆能力下降,黑灾、白灾、鼠虫害、风灾等自然灾害频繁,摆脱不了贫困落后局面。

3. 草原退化和草山破坏导致国土生态环境恶化

由于草地大都分布于青藏、云贵、蒙新和黄土高原和黄河、长江上中游高山陡坡山区,因而草地退化、沙化加重了全国风沙危害、水土流失和土地沙漠化、石漠化的扩展,影响到黄河淤积加剧、长江水患加重、沙尘暴愈演愈烈。同时,草原上的珍稀野生动植物资源也遭到毁灭性破坏。由于鼠虫的天敌减少,促使鼠虫害蔓延,更加重了生态环境恶化。

从全国土地荒漠化、水土流失和沙尘暴区域分布和成因来看,除小部分源于森林砍伐和耕地退化外,主要源于草地生态的破坏。它已危及到农村、工矿区、城镇生产生活的安

全,并在国际上造成一定的负面影响。

4. 草地资源管理建设落后对中国农业持续发展和农村进入小康的不利影响

我国农业持续发展中存在着三大基本矛盾:一是农业发展与人口不断增加、耕地不断减少的矛盾;二是社会对粮食(包括转化为肉、奶、蛋的饲料粮)需求不断提高与粮食增长有限的矛盾;三是提高粮食单位面积产量与农业生态恶化(风沙危害、水土流失、土地沙漠化、水资源短缺)的矛盾。而在我国加入WTO后,又增加了一个新的基本矛盾:即我国农产品要扩大进入国际市场与国外质优价低的农产品要打入我国内市场的矛盾。

无疑,这些基本矛盾如不妥善解决,必将影响我国农业的持续发展和农村进入小康。因为靠人均 $0.1hm^2$ 耕地、生产400kg粮食是无法达到农村人均年收入800美元和农村劳动力转移问题的。而要妥善解决这些基本矛盾,就必须尽快优化开发我国的草地资源,让它在农业持续发展中发挥支柱作用。

事实上,我国草地资源优化管理开发的滞后,已对农业和国计民生产生不利影响。如:

我国是泱泱草国,但羊毛不能自给,毛纺工业每年所需羊毛原料2/3以上依赖进口,耗费外汇10亿美元以上。

我国奶类产量不足,人均奶消费水平排列世界末流。20世纪80~90年代靠联合国援助奶粉加工还原,才满足20个大城市对奶的需求。

我国饲料工业中,蛋白质饲料严重短缺,每年需从国外进口鱼粉、豆粉、骨肉粉等百万吨以上,花去大量外汇。由于饲料质量不高,造成畜产品质量低,难以在国际市场上进行有力竞争。

5. 草地资源优化管理开发落后,影响到东西部地区发展差距的加大

我国西部12省(市、区)是五大民族自治区和七大牧区所在地,总面积占国土的70%。而在西部土地总面积中 ,草地占49.12%,林地占8.4%,耕地占7.49%。草地构成西部土地资源和环境空间的主体。正是由于长期以来草地资源管理开发落后,加上农、林业的薄弱,使得西部社会经济和科教文化长期处于贫困落后的状态,同东部的发展差距越来越大。

不久前,钱学森在给中央领导的一封建议书中讲到总结西部开发的历史经验时说,西部开发需要同西部的经济基础,即农业的发展结合起来。而要搞好西部农业,也应有新思路。并着重提出要发展沙产业和草产业。

由于西部是五大民族自治区和各少数民族聚居区,所以东西部发展差距的加大,意味着边远少数民族区与内地汉族区发展差距的加大,实质上是扩大了“民族间事实上的不平等”,这是同马克思主义的民族政策不相符的。正如周恩来总理1957年在民族工作座谈会

上所讲:“我们不能设想,只有汉族地区工业高度发展,让西藏长期落后下去,让维吾尔自治区长期落后下去,让内蒙古牧区长期落后下去”,“如果让落后的地方永远落后下去,这就是不平等,就是错误。”

三、钱学森提出创立知识密集型草产业的科学意义

20世纪80年代,在国家立草为业的方针指导下,全国在草地管理和建设上,建立了草地资源调查与动态监测、草地管护、草地立法、草地家庭承包经营、牧草种子繁育与检验、飞播牧草、草地植保、草地类自然保护区、草地科研与教育、草地牧业综合发展示范项目网等十大基础体系,为草地资源大规模开发打下了基础。

20世纪80年代中叶,钱学森首次提出创立知识密集型草业产业,其基本含义是:以草地为基础,利用日光能量合成牧草,然后用牧草通过兽畜通过生物,再通过化工、机械等一切可以利用的现代科学技术手段,建立起创造物质财富的高度综合的产业系统。他说,除草畜统一经营之外,还有种植、营林、饲料、加工、开矿、狩猎、旅游、运输等经营活动。草产业也是一个庞大复杂的生产经营体系,也要用系统工程来管理,也当然是知识密集型的草产业了。后来,钱老在关于草产业的30多封通信中,又不断地丰富了这一论述内容。

知识密集型草产业是钱老科学的宇宙观和他创立的开放的复杂巨系统理论与集大成智慧学说在草业方面的体现和贡献。它首先把以草地为载体和空间的牧草和一切共生资源看做是一个密切相关的统一体,草产业就是要运用生物、机械、化工、信息等一切可利用的现代科技手段,综合开发草地上以牧草为主的共生资源,在种植优良牧草、改良土壤、建立优化生态系统基础上,发展草、牧、林、渔、工、商、旅等连锁产业,建立起高度综合的、能量循环的、科学管理的、生态优化的、多层次、高效益的产业巨系统。这就把历来草地资源开发利用上孤立分割、技术分散、效益单一的传统方式,变为综合开发、科技密集、效益耦合的科学方式。

钱老知识密集型草业观不仅符合现代科技发展相互渗透、借鉴、结合的大趋势和社会经济发展要求持续高效优质的规律,而且完全切合国情和历史经验教训,具有科学的理论根据、实践根据和现实根据。对优化管理开发我国草地资源,实施21世纪可持续发展战略,具有划时代意义。

长期以来,人们把草地单纯看做是放牧家畜的天然牧草地,看不到优良牧草和各类共生资源综合开发、科技集成的超优效益。钱老的知识密集型草业观,开拓了科学视野,使人们看到中国草地资源优化开发的巨大潜力和效益;进而看到西部大开发的途径和前景;也看到缩小东西部差距、中国达到发达国家水平的可靠保证。也为中外企业家参与西部开发打开了发展草产业的思路。

钱老知识密集型草产业理论对指导国内外科学界认识和研究中国草地资源科学具有

重要意义。美国世界观察研究所所长莱思特·布朗在关于中国粮食问题研究中，由于忽视中国草地资源存在及其开发在农业可持续发展中的支柱作用，因而作出21世纪中叶中国将发生粮食短缺危机的论断。无疑，这些研究中如能导入钱老的草产业科学观，则一定会做出全面而准确的科学成果。

四、草业系统工程理论与模式的创立和应用成果

从理论和实践上剖析，草产业是一件极为复杂的事物，既包括自然科学，又包括社会科学；既有物理、事理，又有人理；既有种植业、养殖业，又有工业和商业；社会管理中又包括体制、法制、政策、机构、组织、人员配置等。学科门类就更多。在草地资源综合开发和草产业发展中，对于这样诸多变量因子只有把它们条理化、系统化，放到一定系统中一一加以解决，才能达到预期目标，这就是草业系统工程。

为了探索发展草产业的具体途径，在钱老论述指导下，经过80年代以来在20多个省区40多个试点项目的反复实践，我们创立了草业系统工程的基本理论和模式。

按照草地资源开发和草产业综合发展所涉及的领域，草业系统工程可划分为生产系统和管理系统两大子系统(也有的学者主张增加一个科研教育子系统。在工程项目中，我们将它融合在生产、管理二个子系统和八个分系统中。

(一)草业系统工程的生产系统

可分为前植物生产(自然生态)分系统、植物生产(种植)分系统、动物生产(养殖)分系统、外生物生产(加工、商贸等)分系统，这是按草业发展层次划分的纵向系统。

(二)草业系统工程的管理系统

可分为社会、技术、经济、生态四大管理分系统，这是草业的横向系统。

实践证明，在草业开发项目中，只有以草业系统工程的理论和方法为指导，才能把握规律和各环节的链条，达到理想效果。

(三)草业系统工程的基本模式

20世纪80年代以来，我们在运用系统工程理论方法进行草业综合开发的项目中，针对生产和管理子系统及八个分系统中存在的老大难问题，如生产上的技术落后、劳动生产率低及生产与科研脱节、人才缺乏等；经营体制上的个体分散、缺乏社会服务；经济管理上的“平均主义”、“大锅饭”，不讲经济效益和投资有偿回收；产品流通上的产、供、销脱节，不按商品经济规律办事；社会管理上的无法无制、无章可循；组织管理上的官办方式、惟长官意志是从及乱换班子等等弊端，采取了相应的制约措施。经过十多年来在20多省(区)40多个项目区的反复实践，探索出了一条适合当前国情发展草产业的科学道路，即草业系统

工程的基本模式,概况为:明确一个目标,实行三个三结合的方针,采取五项改革措施。

1. 明确一个总体目标

即以发展专业化、社会化、商品化的现代草产业经济为目标。

2. 实行三个“三结合”的方针

即种植、养殖、加工三结合;生产、科研、培训三结合;牧、工、商三结合。这是把草产业建设中存在的各类关系和问题进行系统处理,使之达到现代化草产业的结构和水平。

3. 采取五项改革措施

这是实施一个目标三个三结合方针的具体措施。

(1)改革草地和牧业生产经营体制,建立以适度规模家庭牧场为基础,草业开发服务中心或草地牧工商服务公司为纽带,包括国营、集体不同经济成分在内的新的经济联合体。

(2)改革生产技术,运用现代草地改良、科学养畜及畜产品加工等先进技术手段,实施技术改革。

(3)改革经济管理,坚持按价值规律办事,建立用经济手段管理经济,讲求效益的制度。

(4)改革产品流通体制,坚持贯彻改革、开放、搞活的方针,草业经济联合体实行生产、服务、流通三结合,产、供、销一体化的体制。

(5)改革项目组织领导和总体管理方针,实行项目管理,按照程序实施、检查和验收;由草业经济联合体自主执行和运转。在管理措施中采用法制、经济和教育三结合手段,保证项目健康发展。

近十多年来,各省区运用这一模式,在不同类型地区建立草业综合发展的试验示范项目中,结合自己特点和优势,又创造出了许多不同形式的具体模式。如内蒙古西部干旱草原区的达拉特旗五股地家庭牧场模式,新疆荒漠草原区的阜康灌溉草地牧业经济联合体模式,贵州高寒草山区的威宁灼圃现代草业科技合作牧场模式,云南红壤贫瘠草山区的曲靖种草养畜联合体模式,湖南高山草山区的城步南山牧场种草、养牛、奶粉加工系统模式,湖北贫瘠高山区的鄂西种草养畜奶粉加工模式,海南热带草山区的白沙县草地牧业综合发展模式,广东南亚热带低山丘陵区的果草结合模式,天津宁河盐碱洼地的渔草结合模式等。其共同性是都具有较优化的生产管理体制和技术,都具有较高的经济效益、生态效益和社会效益。一些项目生产力水平已接近或赶上经济发达国家同类型草地的先进水平。

草业系统工程基本理论和模式的创立和应用,为具体发展知识密集型草产业探索出一条成功的道路。它在内蒙古项目运用中获得国家部级科技进步二等奖。在国际学术交流中,引起国外科学界的重视。这个框架模式,能够把不同层次的科技内涵和建设规模包含在内,由初级到高级阶段性发展。1992年元旦,钱老在给我的信中说:“草产业理论已有

了初步框架,今后还要在实践经验的总结中不断提高。”并指出:“这几年我国草产业已有不少成功的试点从实践中证明草产业的概念是可行的,大有前途的。但也要看到,已有的成就距知识密集型草产业还有很大的距离,因为生物科学60年来的科学革命和高新技术,在草产业的应用还差得很远。真正知识密集型草产业的出现,中国的第六次产业革命,将在21世纪下半叶。”愿我国科技工作者积极向草地资源开发的广阔领域进军,把现代生物科学革命和信息、纳米等高新技术成果应用于发展知识密集型草产业,早日实现钱老的预见。

五、知识密集型草产业的开拓前景与功效

(一)发展农区草产业和生态农业,解决农业持续发展问题

可通过发展农区草产业,发挥优质豆科牧草改良土壤、兴牧增肥的生态经济功能,结合农业精耕细作的传统优势,再加上水利、育种及优化开发农区草山等措施,建立粮—经—饲(草)三元种植与农牧结合结构,可做到:①提高低产田粮食单产1倍到几倍,增加后备高产农田数千万公顷,保证未来我国人口增长对粮食需求的安全;②在土壤生物改良基础上,发展特种种植业和名、优、特产品,扩大外向型农业经济;③发展农区绿色饲料业、绿色养殖业和绿色食品产业,开拓国内外市场;④转移农村剩余劳力,扩大就业,促进小城镇建设。由此达到农业优质高产高效,农民致富,企业增收,农村繁荣兴旺。

(二)发展牧区草产业和生态畜牧业,解决牧区生态经济繁荣发展问题

在保护、改良草原和兴办人工草地的基础上,结合营林、水利、开发风能、太阳能技术、建立冬春饲草储备库、舍饲建设等措施,恢复草原优良生态和生物多样性园地生机,综合发展优质高产高效绿色草原畜牧业为主的多种经济,使牧区畜牧业的产品品种、质量、产量和产值成倍提高,牧区绿色商品畅销国内外市场,达到牧民致富,企业增收,牧区繁荣兴旺。

(三)发展绿色蛋白质饲料草产业,开拓草产品国内外市场

针对我国配合饲料中蛋白质饲料年缺口千万吨以上和欧洲等地发生疯牛病,世界对植物蛋白质饲料需求日增的状况,可通过广种优质豆科牧草,开展钱老提倡的用牧草快速、高温、低耗烘干加工新技术,生产绿色蛋白质饲料,供应国内外市场。促进世界无污染绿色养殖业和绿色食品业的发展,又是农牧区企业经济发展可取的一条长盛不衰、持续高效的途径。

(四)发展生态治理工程型草产业,解决国土治理区生态经济持续发展和保护生物多样性问题

在国家实施沙化治理工程、水土保持工程、退耕还林还草和保护生物多样性等绿色生态建设工程中,发挥优质牧草(特别是旱生、超旱生牧草)防风固沙、保持水土、改良土壤及饲用、药用等诸多优势,结合开发水利、风能、太阳能技术等措施,发展以种植优良牧草为基础,草、灌、乔结合,牧、农、林结合,综合发展绿色种植、绿色养殖、绿色食品加工及旅游业等综合产业,使国土治理区实现生态与经济的可持续发展,珍稀野生动植物资源得到有效保护。

(五)发展林区草产业,解决林果区生态经济持续发展问题

开展林果间种植豆科牧草,通过改土、除莠、助长、提质,不仅可达到林茂果丰,还可通过割草养畜、养禽、养鱼,大大提高经济效益,使林区实现生态与经济双优。

(六)发展南方少数民族山区草产业,解决少数民族经济繁荣发展问题

中国南方有 7 333 万 hm^2 草山草坡,具有气候温暖、雨量年均 800mm 以上的优势。在各具民族传统特色经济基础上,广种优良牧草,实行草畜(舍饲)结合、草粮结合、草果结合、草林结合,大力发展山区绿色特种种植、养殖、加工、民族特色产业以及旅游业等,达到生态持续优化、经济持续发展、民族繁荣进步。

(七)发展滩涂渔区草产业,解决盐碱滩涂区生态经济发展问 题

可通过在盐碱滩区挖池筑坝,池内养鱼,坝上种草,割草喂鱼,并建立草、鲢、鲤三层结构的优化养鱼系统,达到既可改造盐碱滩地,又可促进渔业发展,增产增效。

(八)发展城镇草坪绿化产业,解决城市环境优化问题

随着迎接举办 2008 年奥运会和居民对绿色环境越益迫切要求,为实现人均占有 $25m^2$ 绿草地的现代化城市和居民健康环境标准,持续发展草坪产业。

六、启动全国性大规模草产业工程必须创新草业管理机制

当前,制约草产业大发展的主要症结在草业管理系统中需要创新机制,主要有以下四方面。

(一)创新国家草地管理机制,建立部级草地管理机构及相应体制

长期以来,正是由于在中国六大自然资源中惟独占国土 41%的草地没有部级管理机构,因此也就没有产业地位、发展规划、投资预算、执法队伍以及科研、教育等支撑系统。

这是造成我国草地管理建设不力，草地退化沙化不堪收拾，同发达国家生产力差距越来越大，甚至下情不能上达的总根源。在目前体制下，即使国家对草业投入大量资金，也难以管好用好。钱学森早在20世纪80年代就多次向中央建议，国家应设立草地管理局或草业部，并坚持这一意见不变。只有创新国家草业管理机构，才能有效地启动全国性知识密集型草业的大发展。

（二）创新草地经营体制，坚持落实草地长期有偿家庭承包经营或企业承包经营的责任制

这也是钱老关注的问题，是实现草地有效保护、合理利用和科学管理建设的关键。这样，才能有效地执行草原法制，实现以草定畜，增草增畜，推行高新技术措施，发展知识密集型草产业。

（三）创新生态治理工程和草业建设工程的运行机制

对承包到户的草地，可实行国家有偿投资，特民贷款兴建的方式。对国家治理的工程，可由国家主管部门确定项目建设计划，规定工程目标、指标、期限、投资额度和监督、验收等制度，由有资格的绿色草业工程公司或专业工程队按项目承包的方式兴建。这样，既做到建设一片，成功一片，见效一片，又做到资金回收，周转扩大再建设，从而有效地推动全国草产业大发展。

（四）把草业高新科学技术的研究和推广应用纳入国家重大科研项目计划

当前，世界经济发达国家已将生物、信息等方面的高新技术用于开发草地资源，进行转基因作物、医药和新能源等的研究和开发。这正预示着钱老讲的第六次产业革命——生物技术革命的到来。而我国草业高新科技与研究，尚未得到国家主管部门和中国科学院的应有重视与支持。只有尽快改变这一状况，才能推动知识密集型草产业的尽快发展。

七、结　语

钱老在20世纪80年代预言：中国3亿hm^2草原将来有可能年产值达到几千亿元，草业产业的前途是十分光明的。中国工程院院士任继周预测：南方草地如通过草地农业系统使生态建设与生产开发同临近地区建立起相应的系统耦合，其增产幅度可达7.28亿吨食物单位。

如果我国在21世纪开头的30年内使草地资源得到全面保护和重点优化开发，通过开展草业系统工程发展知识密集型草产业，将30%草地建为人工草地，将占耕地1/3的低产

田改造为高产田，将占林地1/2的疏矮林区实行林草结合，将城乡裸露土地建成为黄土不露天的绿草地，将草原太阳能、风能、生物能等相关资源开发利用起来，则我国农牧业产值和农牧民收入将会成倍、成十倍地增长，城乡生态环境得到有效治理，东西部发展差距逐步缩小，从而保证21世纪中国人口、资源、环境、富裕和少数民族经济可持续发展。

钱老对弱小的中国草业和草业工作者是破格地鼎力支持和热忱鼓励的。如他同意亲自任中国系统工程学会草业委员会的名誉主任，同意草业委员会用他的名字设置“钱学森草产业科学奖金”。他为草产业发展亲自给草业界人士写信，仅他给我的亲笔信函就有30多份。在中国草业协会建立时，他致信勉励草业界同志说：“要大力宣传知识密集型草产业及第六次产业革命的光辉前途，要看到21世纪！光明的未来！看到美好的未来了，中国人就要通过革命的实践去创造这个未来。”2001年元旦，钱老致函“向草业界同志拜年”。我在春节向钱老贺辞：“博学宏论瀛瀛，科巅建树森森，贺我大师钱老，喜度九十春风，金蛇狂舞欢庆，四海齐颂功勋”，聊表草业界对钱老的敬意。

参考文献

1 钱学森.关于草业的论述.草业科学，1992.4～11

2 李毓堂主编.中国资源科学百科全书·草地资源学卷.北京：中国大百科全书出版社，中国石油大学出版社，2000

3 农业部畜牧兽医司，全国畜牧兽医总站主编.中国草地资源.北京：中国科学技术出版社，1996

4 李毓堂主编.1991～2020年全国草地区域开发规划·畜牧业经济发展第八个五年计划和十年规划.北京：民族出版社，1991

5 中国科学院可持续发展研究组.1999中国可持续发展战略报告.北京：科学出版社，1999

6 周恩来.关于我国民族政策的几个问题.见：周恩来选集(下卷266页)；北京：人民出版社，1984

7 李毓堂.草业——富国强民的新兴产业，宁夏人民出版社，1994

作者简介：李毓堂　1935年出生，回族。中央民族大学研究生毕业。高级经济师、兼职研究员。国务院特殊津贴获得者。英国皇家联盟科学院荣誉院士。现任中国系统工程学会草业系统工程专业委员会主任，中国草业协会常务副会长。历任农业部畜牧局草原处处长，国务院京津周围绿化领导小组办公室副主任，全国草地区域开发规划编制组主编，中国资源百科全书草地资源科学卷编委会主编，中国草原学会代理事长，中国草坪研究会理事长，中国土地学会常务理事，中国水土保持学会理事，中国自然资源学会理事。多年从事游牧民族与牧区经济，草地管理与方法，草业系统工程，草业发展规划、计划和方针、政策、战略的研究。主笔起草修改制定中国首部《草原法》。主持建立了全国草地管理建设十大基础体系。主持开展了全国20多个省区、40多个现代草地牧业综合发展示范项目及100多个飞播牧草试点项目。在钱学森先生的倡导下，创建了中国草业系统工程的理论和基本模式。在草业系统工程项目中作为第一完成人获国家科技进步二等奖等多项奖励。20世纪80年代以来，主编出版《草地管理与技术文

献汇编》(1、2册)、《十一届三中全会以来,中央国务院和中央领导同志关于发展草业的指示》、《草原法》、《1991~2010年全国草地区域开发规划及八五计划纲要》、《中国资源百科全书、草地资源科学卷》等书。发表学术论文100多篇,著有60多万字的《草业——富国强民的新兴产业》专著。

钱学森对军事科学发展的贡献

糜振玉

钱学森同志是在国内外享有崇高声誉的著名科学家,他为我国科学技术、国防科技事业,特别是"两弹一星"事业做出了卓越贡献,是国务院、中央军委至今惟一授予"国家杰出贡献科学家"荣誉称号和一级英雄模范奖章的科学家,并荣获国家"两弹一星功勋奖章"。他是我国科技工作者的优秀代表,是与雷锋、焦裕录、王进喜等一起被中共中央组织部列为新中国成立以来在群众中享有崇高威信的共产党员的优秀代表,深受全国人民和军队的敬仰与爱戴。近半个世纪以来,钱学森同志除领导和参与国防科技研究外,对我国军事科学研究也倾注了大量的心血,提出了许多重要的思想与观点,为国防精神和军队建设,为军事科学的发展,做出了重大贡献。下面仅从我在工作中接触到的谈几个事例。

一、强调军事科学在现代科学技术体系中的地位作用,提出了军事科学体系的构想

1985年3月4日,军事科学院军事运筹分析研究所召开首届全军性作战模拟经验交流会。钱学森同志应邀参加会议并做了讲话。他除了论述作战模拟对国防现代化发展战略和武器装备发展、未来作战的重要作用外,还专门论述了现代科学技术体系以及军事科学的地位、作用和军事科学体系。此后,仅据我了解的,钱学森同志在1986年9月首届全军战役理论学术讨论会的报告中,1994年在《科学的艺术与艺术的科学》一书中,1998年在原国防科工委科技委召开的"军事系统工程学研究发展20年报告会"的书面发言中,1999年在与军事科学院王祖训院长谈军事科学发展问题时,都论述了这个问题,而且他的观点在不断发展、不断完善。可以说,十多年来,钱学森同志一直在思考和研究这个问题。

(一)对于军事科学的意义

首先,他肯定地认为战争是一门科学。他说:"战争是由许多部分构成的不可分离的有机整体。在人类全部的社会实践中,没有比指导战争更强调全局观念、整体观念,更强调从全局出发,合理地使用局部力量,最终求得全局最佳效果的了"。他还说,打仗不仅受地势、气候等条件的限制,而且敌我双方是敌对的,谁也不知道对方的情况,知道一些又不全都知道。"所以打仗就是在限制条件下,敌对双方并不完全了解对方全部情况下进行的"。"战争问题尽管很复杂,但它也是客观世界的现象,因而也是有规律的,是可以被认识

并掌握的,这就是战争的科学。""由于科学技术的发展,新的武器、装备不断涌现,改变了战争的客观环境,这就要求军事指挥家的思想必须跟上战争环境的变化,总结、提炼出新的规律,否则就是危险的,要打败仗的。"他指出:"我们要用现代科学技术来研究战争的规律,研究战争这一门科学,这就形成了现代军事科学。"

钱学森同志特别强调"军事科学有广泛的意义"。他认为,军事科学来源于打仗,但它研究的对象不只是打仗,经济的竞争、科研里面的策略、国际贸易的商战、外交斗争等,都是有对抗性的,都是"打仗",只不过是打"文仗"。他说:"军事科学的意义,当然对国防建设是非常重要的,但是军事科学的意义不限于仅仅是国防建设。对于社会主义的物质文明建设,对于社会主义的精神文明建设,对于我们实现四个现代化都具有重大意义。"他主张:"真正用全部军事科学的方法,用于打多种文仗,把军事科学也作为学习'领导科学'的一门必修课,使领导者高瞻高瞩,雄才大略,作用将是很大的。"他认为军事科学是现代科学技术体系中与其他学科门类"平起平坐"的一门重要的科学知识。1999年春节期间,军事科学院王祖训院长和我去看望钱学森同志时,他再次论述了他的这一看法。他说,"军事科学是一个独立的部门,是和自然科学、社会科学等平起平坐的一个很重要的部门。这是我对军事科学的总体看法。……现在是在江主席的领导下,我接触到他的思想非常解放,很活跃,知识面很广。他在提出'讲政治'的同时,也号召我们要'讲学习'。搞研究工作的,思想也要开阔一些。所以,在这里我要把军事科学的意义展开一下,实际上它的意义已超出了军事范畴。现在人类已经进入到这样一个历史阶段,即人类的斗争是非常复杂的,除了军事上的斗争,还包括政治的、经济的、民族的、社会的等,各种斗争无不与军事科学思想有关。日本人就意识到这一点,前几年我从资料上看到他们说,所谓军事科学就是斗争的学问。实际上这个斗争是多方面的,工商业竞争也是斗争。日本人围绕这个问题,读中国的兵书,学习《孙子兵法》,得到很多启示。这样说来,所谓军事科学就是斗争的科学,除了用兵器斗之外,还有许多'斗'的手段。我看了以后,很受启发。……作为学问,我们要看到军事科学理论的许多东西可以用在其他方面。所以,军事科学是很重要的一门学问,可以说,我们建国就离不开军事科学。"

(二)关于现代科学技术体系和军事科学的体系

钱学森同志自20世纪80年代起在多次会议和论文中讲过。我感到最完整的论述是1998年3月31日,在原国防科工委为纪念钱学森同志提出建立与发展军事系统工程学科20周年而召开的"军事系统工程学研究发展20年报告会"上所写的书面发言。他在这个发言中写道:"后来我又进一步构筑了现代科学技术的体系:在整体上以马克思主义哲学、辩证唯物主义作指导,在军事方面有军事科学这个大部门,与之并列的有自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、行为科学、地理科学、建筑科学和文艺理

论，加军事科学一共十一个大部门。每个部门又分三个层次：基础理论层次，技术理论层次，应用技术层次。在军事科学，基础理论层次是军事学，技术理论层次是军事运筹学，应用技术层次是军事系统工程；当然还有其他学问。这是人类知识的体系了。当然每一个大部门也不是孤立的，大部门之间还有相互的联系：显然军事系统工程与系统科学有关。”他还强调指出：“我们这次报告会也是进一步明确上述这个人类知识体系的会议。”我想，这个现代科学技术体系和军事科学体系，是钱学森同志经过十几年来深思熟虑的研究所得出的结论性的观点。钱学森同志之所以这样构筑现代科学技术体系，都是有依据的。例如关于数学学科，钱学森说：“大家看到一个问题，就是社会科学也要用数学方法，现在不是有数量经济吗？不是有计划学吗？这些都要用数学方法，都要用计算机。这样首先一个问题就是把数学放在自然科学里就不合适了，所以就出来一个数学科学。”“数学就是从量跟质的辩证的变化为基础的角度来研究整个客观世界。”又如军事科学的军事学，他指的是军事科学的基础理论，包括战略学、战役学、战术学、军制学和军事地理等学科。所以，钱学森同志构筑的现代科学技术体系和军事科学体系，值得我们很好地去思考、去领会、去实践。

二、对国防战略提出了重要建议

1986 年 9 月，钱学森同志就国防战略提出三点重要的咨询建议。

(一) 建立有限战略核力量

他指出，为了遏制超级大国的核威慑，为了保持我国的大国地位，我们要有一定数量的或叫最低限度的核反击力量。这个核反击力量，生存能力要高，反应要快，突防能力要强。

(二)开发航天技术

他指出，人类征服世界是从陆地到海洋，从海洋到空中，再从空中到天上的。陆地局限性很大，航海、航空和航天则能使人们到达地球上任何一点。而三者比较起来，又以航天飞行器(包括人造卫星、航天飞机和空间站等)巡航速度最快。为显示我国实力，航天技术有极大的优势。

(三) 打好小仗

他指出，我国幅员广大，地形和气候条件很复杂，东北、西北、西南和南方边界地区自然条件各不相同，而边界局部地区的小仗也时有发生，这种小仗可能是我们在 2000 年之前到 21 世纪初主要的战争样式。对付这种小仗，我们完全没有必要搞很大规模的常规部队。要搞些常备的、能打这种高水平小仗的部队，这是我们平时必须保留的、精锐的、可以

马上打仗的部队。应该认真地从军队的编制上、装备上解决一下打小仗的问题。这对将来打较大规模的战争也是一个基础。

钱学森同志从宏观上提出的战略性建议,都是符合国际形势、国家安全需求、战争形态变化和军事技术发展等客观实际的,具有很强的全局性、前瞻性和可行性,受到军队领率机关和军事科学研究机构的高度重视并在实践中得到体现。

三、倡导并指导军事系统工程和军事运筹学学科的建立和发展

军队的军事系统工程和军事运筹学学科是在钱学森的倡导、促进和指导下建立和不断发展的。

早在1979年7月,钱学森同志在军队总部机关领导同志的学习会上,就以《军事系统工程》为题做了演讲。我认为,在这次演讲中,钱学森同志对军事系统工程的作用和功能进行了"定位",那就是在军事路线和军事战略这些根本性问题解决以后,军事系统工程就是运用现代科学技术方法更好地去解决贯彻执行军事路线、军事战略中的实际问题,并指出军事系统工程要解决的主要内容:一是作战模拟;二是武器装备系统的设计方案论证、战术技术指标的确定与效能评估;三是后勤系统的组织管理如物资的库存、需求、消耗、补充、运输的组织管理;四是组织建立作战指挥体系,如指挥自动化的设计;五是对战略问题进行定量分析和战争模拟。钱学森同志的演讲,为军事科学研究开辟了一个新的领域——军事系统工程。

1989年,钱学森同志根据系统工程研究中遇到的问题,提出了"从定性到定量综合集成法";1992年,钱学森同志又进一步提出了这种方法的应用形式——"从定性到定量综合集成研讨厅"。这些都对军事系统工程学的深化与发展起到了重要作用。

运筹学于20世纪50年代初被引入中国,在外国称为"Operation Research",原意是作战研究。我国数学家许国志教授从《史记》"夫运筹帷幄之中,决胜于千里之外"这一名句中,取其"运筹"两字作为这一学科的中国译名,专家们都很赞同。1956年,在钱学森、许国志教授的倡导下,中国科学院成立了第一个运筹学研究机构,在军事领域也得到运用,对军事运筹学的发展起到了积极的促进作用。1978年5月,中国航空学会在北京召开了军事运筹学座谈会,钱学森、许国志教授建议在军队开展军事运筹学与系统工程的研究试点工作,得到了张爱萍、刘华清等领导的支持,开始应用军事运筹学与系统工程的理论和方法评估武器装备的试点工作。1979年,中国人民解放军在军事科学院成立了第一个军事运筹分析研究机构——作战运筹分析室;1981年,成立了中国系统工程学会军事系统工程委员会;1984年,成立了中国人民解放军军事运筹学会;1992年成立了军事系统工程专业委员会、国防系统分析专业组。许多机关、院校、部队也先后建立了各种专业论证分析机构,

在军内有组织地开展军事运筹学的研究与推广应用。1987年6月,军事科学院军事运筹分析研究所创办了《军事系统工程》杂志,现改为《军事运筹与系统工程》杂志;1993年4月,军事科学院出版了《中国军事百科全书·军事运筹学》分册;1993年5月,军事科学院出版了《军事运筹学》专著;1993年6月,军事科学院出版了《中国军事百科全书·军事系统工程》分册。现在军队院校和科研院所已有军事运筹学3个博士授权点、18个硕士授权点;系统工程2个博士授权点、4个硕士授权点。军事运筹学和军事系统工程已经在战略战术研究、部队编制体制和兵力结构研究、武器装备发展战略研究、武器系统的论证、研制、试验和作用研究、后勤保障研究等方面得到广泛运用,取得许多成果,并培养了一大批专业人才。军事运筹学和军事系统工程学的发展和取得的成绩,都离不开钱学森同志多年来的关心和指导。

四、提出用柔性自动化生产系统改革军工企业,为打中等规模战争作动员准备

在世界大战和外敌全面入侵战争在相当长的时间打不起来的国际形势下,钱学森同志在主张打好小仗的同时,还提出在战争动员问题上,要为打中等规模战争作好军工企业的动员准备。

钱学森同志指出,中等规模战争持续时间较长,消耗比小仗大得多,除了要动员兵力外,还需要动员全国相当大一部分财力和工业生产能力,而这是要在平时有准备才行的。所以他提出,军工企业要实行“军民结合”,而民用企业要做到“民军结合”。在军品生产上,要安排好战争动员的优先次序问题。仗打起来后,为了保障持续作战能力,可能首先最急需补充的是弹药和零部件;其次是替代和补充武器装备的损耗,再就是根据作战需要研制新型武器系统。为此,他提出:用柔性自动化生产系统改革军工企业,是提高军工企业战争动员能力的一种革命性措施。柔性制造系统,就是将数控机床、自动化机器、工业机器人、电子计算机等为主体的硬设备,按系统工程的原理把它们组织并运行起来,成为制造过程高度自动化的生产系统。其优点一是能迅速适应多变的新产品生产,大大缩短生产周期;二是实现高度自动化,保证产品的高质量;三是可最大限度地发挥生产设备利用率和降低成本。据他测算,推广柔性制造系统可使整个社会劳动生产率提高一至四倍以至更多;它比传统的机械加工方式可减少50%的机床、70%的人员、50%的工装成本;可缩短重新调整设备时间6倍,降低成本20%。他指出,在现代条件下军工生产的特点是批量小、品种多、型号设计多变,新产品试制频繁,不断采用新材料和新工艺,产品质量要求高且稳定等。这些正是柔性制造系统可以发挥优势的地方。同时,采用柔性制造系统及有关技术,平时可为国民经济服务,提供质优价廉新颖的产品,而战时又可以很快转入军品生产。因此,它也是实现“军民结合”和“民军结合”的一项带根本性的技术措施,是具有

战略地位的重要举措。钱学森同志的观点,为军工企业的改革和民用企业的战时动员准备,提供了重要思路。

五、根据高技术战争的需求,对军队干部的科学文化和军事素质提出了更高的要求

1986年,钱学森就认为,高技术革命必将带来军事技术的迅速发展,军队将成为知识密集的部门。在未来的战争中,将广泛使用各种先进武器系统,战场情况错综复杂,瞬息万变,单一兵种的独立作战将越来越少,更多的是协同作战、联合作战,除陆海空军与二炮协同作战外,甚至还有天军参战,这就增加了作战的复杂性,从而对指挥人员的科技文化和军事素养提出了更高的要求。他在分析外军和我军的军官文化水平差距后提出,为了应付21世纪可能发生的战争,需要把我军培养成一支现代化的军队,干部要逐步达到大学毕业的水平,师职干部要是硕士,军职干部要是博士。战士的文化水平也要相应地提高。因此,军队院校应做好培养人才的工作,同时也要加强在职干部、战士的教育、训练工作。对于钱学森同志的这个观点,当时,很多人同意,但也有一部分干部乃至领导干部不以为然。但是,严酷的高技术战争现实,特别是海湾战争的现实,使更多的人认同了钱学森同志的观点。从1987年起,一部分军队指挥院校开始招收军事学硕士研究生,20世纪90年代军队指挥院校和科研院所研究生教育有了较大的发展。1993年,国防大学和军事科学院首批获得军事学博士授予权。在国务院学位委员会及其办公室的大力支持下,现在除理工、医学的院校和科研院所外,军队指挥院校和科研院所已有17个单位被批准为军事学博士学位授权单位,被批准的军事学博士授权点有40个;有41个单位被批准为军事学硕士学位授权单位,军事学硕士授权点180个。已毕业了6届军事学博士研究生,11届军事学硕士研究生,几千名干部获得了军事学硕士学位,几百名干部获得了军事学博士学位。部队里有了硕士团长、硕士舰长,有的师已有了博士学位的领导干部。尽管博士、硕士在干部中所占比例仍不高,但由于军委、总部领导的重视,加强了研究生教育,部队中的博士、硕士数量将会以较快的速度增长。在促进军队研究生教育方面,钱学森功不可没。

六、提出军事科学院、国防大学、总装备部科技委要加强合作,优势互补,使军事科学研究有一个更大的发展

1999年春节期间,钱学森同志对前去看望他的总装备部首长和军事科学院领导提出,军事科学院、国防大学、总装备部科技委在工作中要更好地合作,发挥各自的优势,共同探讨我军发展的重大问题,使军事科学及相关学科的研究在21世纪有一个更大的发展。

钱学森同志对军事科学院的领导说:科学的发展问题,互相交叉、互相作用、互相借鉴是离不开的。国防建设是个大问题,在实践中遇到的问题都带综合性。但专家们看问题都是从自己的专业出发,往往有局限性,所以目前的办法是把专家们组织起来,提倡学科之间的互相交流与讨论,而不能排挤别人,关起门来自己干。他说,马克思、恩格斯那个时代,就是跨学科研究问题,从而创立了马克思主义。马克思本来是搞哲学的,却研究经济学,写出了《资本论》和《政治经济学》。恩格斯也不是学自然科学的,但为了研究哲学中的辩证唯物主义,下苦功夫学习、研究自然科学,结果写出了《自然辩证法》。他们若不跨学科研究,是写不出这些经典著作来的。钱学森同志还联系自己的经历,说他自己在美国加州理工学院是学航空的,但凡是他感兴趣的学问都去学,都去听。数学系的复变函数、偏微分方程等去听;物理系的量子力学、相对论、统计物理等也去听。钱学森同志深有体会地说:"这对我后来的科学研究和实际工作有很大作用。回国后中央叫我搞导弹和航天,正好需要很广泛的知识,所以工作还基本胜任。再往后我搞科学技术体系研究,那就更广了,没有当年比较雄厚的基础就根本没有这个眼界。""所以我主张军事科学院、国防大学和总装科技委,甚至包括军兵种的人要在一起多加讨论,加强联系,加强合作。"

钱学森还强调,解放军要迎接21世纪,人才是很重要的一个方面,要培养一些跨学科的人才、帅才,不然适应不了。军事科学院、国防大学都是非常重要的单位,都有培养人才的任务。

早在1993年3月,钱学森同志在同我谈话时就提出,军事科学院与国防科技大学要加强联系和合作。当时军事科学院赵南起院长就命我去国防科技大学商谈加强合作事宜。国防科技大学的陈启智校长、刘中山政委非常同意钱学森同志的意见。接着,陈校长还率领训练部长等到军事科学院访问,共同商定合作事宜,从此,两个单位的联系加强了。军事科学院请国防科技大学的教授到院作学术报告,军事科学院也派研究员去国防科技大学进行学术交流。2001年4月、9月,军事科学院为进一步提高研究生的培养质量,特别是提高研究生运用现代手段进行科研创新的能力,根据军事科学院首长关于加强研究生理论与技术、教学与研究、院内与院外相结合的指示精神,以及军事科学院与国防科技大学联合办学协议,组织两批2000级博士、硕士研究生去国防科技大学选学国防科技发展战略、管理系统工程、自然辩证法等相关课程,同时参观国防科技大学的科技成果馆、校史馆以及"银河"巨型计算机等实验室,研究生们都感到提高了科技素养,收获很大。军事科学院决定今后每届博士、硕士研究生都要去国防科技大学选修相关课程。

1993年,原国防科工委科技委在制定一个规划时,钱学森同志派当时科技委秘书长王寿云到军事科学院同我商讨武器装备发展与军事科学研究的关系,经共同研究,提出了武器装备的发展和研制要"以军事需求为牵引,以科技发展为推动"的原则,经钱学森同志同意,写入了规划。自1988年科技委设置有兼职委员起,军事科学院科研指导部一名副部长

和学术部一名研究员就先后被聘为科技委兼职委员，直到现在。这些，都是在钱学森倡导和推动下实现的。

由于我受了解情况的局限，以上只是挂一漏万地讲了钱学森同志对军事科学发展的主要贡献。错误和不当之处，请各位领导、各位专家批评指正。

钱学森同志是爱国知识分子和科技工作者的杰出典范。我们要响应江泽民主席的号召，向人民科学家钱学森同志学习，学习他严谨的科学精神，学习他崇高的民族气节和优秀品格。在钱学森同志九十周岁寿辰之际，请允许我代表中国军事科学学会会长、军事科学院葛振峰院长和温宗仁政委，以及中国军事科学学会对钱学森长期以来关怀军事科学院和军事科研工作，并给予指导和帮助，表示衷心感谢，敬祝钱学森同志长寿康宁幸福，永葆创新思维！

参考文献

1 钱学森. 见：王寿云著. 军事系统工程的理论和实践. 军事系统工程. 北京：国防工业出版社，1988

2 军事科学院军事运筹分析研究所. 作战模拟的研究与应用. 北京：军事科学出版社，1987

3 钱学森. 我国今后二三十年战役理论要考虑的几个客观问题. 见：通向胜利的探索(上册). 北京：解放军出版社，1987

作者简介：糜振玉 1931年10月出生于江苏省无锡县。1951年1月于山东大学参军，1953年3月加入中国共产党。1954年12月毕业于大连海军指挥学校，任助教、教员；1963年7月调军事科学院，历任主力教研员、研究员、研究室主任、副院长。1988年授少将军衔，1993年晋升中将军衔。第八届全国人民代表大会代表，第九届全国政治协商会议委员。现任军事科学院副院长、中国军事科学学会副会长、中国国际战略学会高级顾问、国务院学位委员会军事学科评议组召集人，研究员，博士生导师。

从简单系统的定量分析到复杂巨系统的综合集成

庄逢甘　黄志澄

引　言

人类的20世纪,是科学技术突飞猛进,推动社会飞速发展的一个世纪,从而创造了科学技术的百年辉煌。在这百年之中,造就了一批杰出的科学思想家,其中也包括我国著名科学家钱学森先生。今年12月11日,是钱学森先生九十寿辰。本文阐述了他从一个杰出的力学家到一个杰出的航空航天科学家,从系统工程到开放式复杂巨系统理论,从发扬科学的民主集中制到定性到定量的综合集成技术的过程。概括一句话,本文谨以阐述他从简单系统的定量分析到复杂系统的综合集成的过程,作为对钱学森先生九十寿辰的纪念。

一、从一个杰出的力学家到一个杰出的航空航天科学家

钱学森1911年12月11日出生于上海,3岁时随父亲到了北京。1929年从北师大附中毕业。1934年夏,钱学森获交通大学机械工程学士学位,考取清华公费留学生,次年赴美。钱学森1935年进入麻省理工学院航空系,1936年10月他转学到加州理工学院,开始了与力学大师冯·卡门,先是师生后是亲密合作者的情谊。1939年钱学森获得了加州理工学院航空与数学博士学位,1945年成为该院的副教授。1947年初,他成为麻省理工学院的正教授。冯·卡门这样评价钱学森:“他在许多数学问题上和我一起工作。我发现他非常富有想象力,他具有天赋的数学才智,并能成功地与准确洞察自然现象中的物理图像的非凡能力结合在一起。作为一个青年学生,他帮我提炼了我自己的某些思想,使一些很艰深的命题变得豁然开朗。”

钱学森在力学的许多领域都做过开拓性的工作。力学发展的源泉来自社会发展的应用需求。由于发展高速飞行器的需要,钱学森早年就对高速空气动力学的发展,做出了杰出的贡献。20世纪30年代开始迅速发展的气体动力学,或者叫可压缩流体力学,为超声速飞行和高超声速的飞行奠定了理论基础,指明了超声速和高超声速飞行器的发展方向。钱学森先生在这方面的贡献包括:

(1) 1938年,钱学森与冯·卡门合作进行的可压缩流体边界层研究,揭示了在可压缩层流边界层中,飞行器的摩擦阻力与气动加热在不同马赫数和壁温比下的相互关系,从而为

确定高速飞行器的气动加热打下了基础。

(2) 20 世纪 30 年代末,试验飞机模型的风洞的风速一般都不高,不能测定飞机在高马赫数飞行时表面受到的压力,因此亟需一个从低马赫数风洞实验结果修正到高马赫数的方法。他在 1939 年发表了关于可压缩流体二维亚声速流动的研究结果,冯·卡门在 1941 年发表了关于空气动力学中压缩效应的研究结果。后来这些结果被称为"卡门 - 钱学森公式"。

(3) 钱学森与郭永怀合作,最早在跨声速流动问题中引入上下临界马赫数的概念。他们发现,对高速飞行真正有实际意义的是上临界马赫数,而不是以前大家所注意的下临界马赫数。这是一个重大发现。

(4) 钱学森首先提出了高超声速流动相似率,为高超声速飞行器的设计奠定了基础。

(5) 1946 年,钱学森将稀薄气体的物理、化学和力学特性结合起来,对稀薄气体动力学进行了开创性的研究。

除此以外,钱学森于 1953 年,正式提出了物理力学概念,主张从物质的微观规律去确定其宏观力学特性,改变过去只靠实验测定力学性质的方法,大大节约人力物力,并开拓了高温高压的新领域。钱学森在固体力学方面,对薄壳稳定问题也有重要贡献。

在喷气推进与航天技术领域,钱学森做出了特别卓越的贡献。加州理工学院古根海姆航空实验室的火箭研究工作,是马林纳、钱学森和其他热心于火箭的人于 20 世纪 30 年代后期开始的。1936 年他在冯·卡门指导下,与马林纳等一起研究火箭发动机的热力学问题、探空火箭问题和远程火箭问题等,并参与了美国早期用可储存液体推进剂的几种试验性火箭,如 1945 年的"女兵下士"探空火箭和后来的"下士"导弹的研制工作。

1949 年,钱学森担任加州理工学院新设的古根海姆喷气推进中心的主任,并讲授火箭技术及喷气推进技术课程。从 20 世纪 40 年代到 60 年代初期;钱学森在火箭与航天领域提出了若干重要的概念:20 世纪 40 年代提出并实现了火箭助推起飞装置,使飞机跑道得以缩短;1949 年提出了火箭旅客飞机概念和关于核火箭的设想;1953 年研究了行星际飞行的可能性;1962 年出版的《星际航行概论》中,他提出了用一架装有喷气发动机的大飞机作为第一级运载工具,用一架装有火箭发动机的飞机作为第二级运载工具的天地往返运输系统概念。

在 20 世纪 40 年代末、50 年代初,钱学森在总结第二次世界大战后,迅速发展的控制与制导工程技术实践时,发现并提炼出了指导控制与制导系统设计的普遍性概念、原理和方法,从而创建了一门技术科学"工程控制论"。工程控制论在其形成的过程中,把设计稳定与制导系统这类工程技术实践作为主要研究对象。1951 年钱学森研究了"一种探空火箭的最优推进的设计",即探空火箭的最优弹道问题,要求提出一条理想弹道,在相同的燃料消耗条件下,使火箭达到的高度最大。1952 年还研究过如何利用反馈控制的方法使火

箭发动机中的燃烧过程稳定,成功地建立了描述燃烧室压力变化规律的方程。第一版《工程控制论》原是用英文写的,1954年在美国出版。此后,俄文版、德文版、中文版相继出版。工程控制论从深度与广度上,推动了电子计算机技术、核能技术、航空航天技术和光电子技术等的发展。

钱学森以他在总体、动力、制导、气动力、结构、计算机、质量控制等领域的丰富知识,在组织领导新中国的火箭、导弹和航天器的研究发展中,发挥了巨大作用,对中国火箭、导弹和航天事业的迅速发展,做出了杰出的贡献。

钱学森从一个杰出的力学家到一个杰出的航空航天科学家的过程,说明了作为综合集成技术的航空与航天的发展,与许多学科有关,其中与研究物质运动和能量的科学——力学的关系最早、最深。一方面,航空航天不断地给力学的发展提出了许多新的课题;另一方面,力学也为航空航天的发展提出了许多新概念、新思想、新方法。航空航天作为力学的需求牵引,力学作为航空航天的主要技术推动因素。航空航天与力学互相促进,相得益彰。因此,许多力学家也都是航空航天科学家,其中钱学森就是把力学与航空航天结合得最成功的一位。

二、从系统工程到开放式复杂巨系统理论

钱学森在我国航天系统工程的长期实践中,提炼出系统工程理论,是他的一大贡献。钱学森说:我们把极其复杂的研制对象称为“系统”,即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体,而且这个“系统”,本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分 1978年,钱学森、许国志、王寿云在《文汇报》上的文章《组织管理的技术——系统工程》,在全国范围内,吹响了向系统工程进军的号角。在20世纪80年代初期,钱学森又提出了国民经济建设总体设计部的概念,坚持致力于将系统工程概念推广应用到整个国家的经济建设。他最早提出了军事、农业等14门系统工程,以后又不断提出诸如草业、沙产业等系统工程。

钱学森在系统科学思想的研究方面的贡献,首先体现在提出一个清晰的现代科学技术的体系结构,并进而形成整个系统科学体系。系统科学是以系统为研究和应用对象的一个科学技术的门类。如同自然科学、社会科学、数学科学等一样,它是现代科学技术体系中一门新兴的科学技术体系。钱学森在总结、概括已有的系统研究成果的基础上,于20世纪70年代末,首先提出了系统科学体系的层次结构。钱学森认为,系统科学由三个层次、很多学科和技术所组成:

工程技术层次——系统工程,自动化技术、通信技术,是直接改造客观世界的知识。

技术科学层次——运筹学……信息论和控制论,是指导工程技术的理论。

基础科学层次——系统学,系统学是研究系统的基本属性与一般规律的学科,是一切

系统研究的基础理论。系统学正在建立之中。系统科学通向哲学的桥梁是系统论或称系统观,属于哲学范畴。

钱学森从力学、运筹学、控制论和信息论及国外正在不断发展的系统学中吸取其精华,形成他对系统学的一整套观点和理论。并亲自组织了讨论班,对它加以研究和发展。到20世纪80年代末90年代初,他又提出开放复杂巨系统的理论及其处理方法 ——从定性到定量的综合集成方法。1992年又提出"从定性到定量综合集成研讨厅"的思想。这些思想不仅在我国国内有着重要而深远的意义,而且在国际上也产生了重要的影响。1995年,国际著名的系统学家哈肯为许国志主编的《系统科学大辞典》写的序言中说:"系统科学的概念是由中国学者较早提出的。我认为这是很有意义的概括,并在理解和解释现代科学,推动其发展方面是十分重要的。"又说,"中国是充分认识到了系统科学巨大重要性的国家之一"。这个评价是非常中肯的。

当今,人类已进入信息时代,整个世界社会通过世界市场和全球信息网络,把不同经济发展状态、不同社会制度、不同意识形态、不同种族、不同宗教信仰、不同地区的国家紧密连在一起。多极化、多格局以及经济的全球化,使人类社会出现了许多开放的、十分复杂的动态巨系统。人类在物质文明与精神文明建设中所面临的问题,千头万绪、变化多端、十分复杂。那么,有没有一种切实可行而又比较科学的方法,使我们能够成功地解决各种复杂性问题呢? 近年来,国内外许多科学家对此进行了广泛的探索,希望得到满意的答案。

在系统学方面,最先取得突破的是普利高津、哈肯等欧洲学者提出的耗散结构论、协同学、超循环论等自组织理论等。他们依托物理学、化学和生物学的最新成果,以若干著名的物理化学系统(如贝纳德流、激光器、BZ反应、布鲁塞尔振子等)为背景,运用系统思想和数学方法,深刻阐明了这些系统,如何从混乱无序的热平衡态产生出有序结构,又如何从一种有序结构演化为另一种有序结构。他们把系统学的研究推进了一大步,使人们相信建立系统科学的基础理论是有可能的。但他们这些理论还带有明显的物理学和生物学的痕迹。严格地说,它们还属于系统科学与自然科学的交叉学科,还不能算作真正的系统学。

从20世纪80年代起,系统学的研究转向了主要研究复杂性问题。欧洲学者,特别是普利高津提出了"探索复杂性"这一响亮的口号,把复杂性研究视为超越传统科学的新型科学,产生了广泛的影响。普利高津和哈肯等人,满怀信心地要把各自的理论和方法推广应用于生物、经济、社会等复杂现象领域,着手建立复杂性科学,形成世界复杂性研究的重要学派。但在近20年来,除在某些局部问题上有所收获外,他们的努力总的来说,并不成功。在复杂性研究热潮中,1984年成立的美国圣塔菲研究所(Santa Fe Institute)特别引人注目。他们面向生命、经济、组织管理、全球危机处理、军备竞赛、可持续发展等当今世界上

的重大问题,开展大规模的跨学科研究,企图建立关于复杂系统的一体化理论,实质也就是企图全面建立系统学。他们在系统学的理论方面,虽然也提出了许多极富启发性的见解,但同样没有取得突破性进展。现在看来要建立所谓复杂系统一体化理论,还遥远无期,以致 SFI 的学者发出了"从复杂性到困惑"(From Complexity to Perplexity)的感叹。

系统学最早的开创者贝塔朗菲认为,存在两类整体。一类是非系统整体,它们具有迭加性,只要认识了组成部分,把部分的特性,加起来就能得到整体特性。另一类是系统整体,特点是"整体大于部分之和",了解整体不仅要了解部分,还要了解部分之间的关系,因为系统的整体性质是由各组成部分相互作用、相互激发而"涌现"出来的。因此,他把这门学科明确界定为"关于整体和整体性的科学",并在系统学中首次引入涌现(Emergency)概念。涌现性的另一种表述是:高层次具有低层次没有的特性,一旦还原到低层次,这些高层次的特性便不复存在。例如,物质在化学层次上具有物理层次没有的特性,在生物层次上具有物理化学层次没有的特性;生命不是物质原子或分子固有的属性,而是物质世界进化到生物层次才有的组织特性,是以生物大分子为构筑材料、按照细胞的特殊结构方式组织起来才能产生的特性;意识是在由大约 1 000 万个神经元组成的人脑这个物质层次上涌现出来的(还需同社会这种复杂环境相互作用),分解到神经元层次便不复存在了。

长期以来,科学主要是沿着还原论的思想发展起来的。还原论相信整体的性质可由部分的性质来说明,高层次的事物可由低层次的事物来解释;相信一切事物都可以用物理学基本规律来解释。还原论也要把握整体,但其基本工具就是力学中的分析 - 迭加法。但复杂性不是物质粒子固有的属性,而是组织的属性。它是在客观世界由低级向高级的自组织演化中逐步涌现出来的,即简单性经过组织而涌现出复杂性。描述较低层次上产生的涌现性,采用分析 - 迭加方法并加以补充或修正,也许可以奏效;但对描述较高层次特别是复杂巨系统所产生的涌现性,这种基于还原论的分析 - 迭加方法,则肯定会力不从心。正是在这里,系统学遇到前所未有的难题。欧洲学派复杂性研究的停顿,在于他们企图把从物理化学系统的自组织现象中,概括提炼出来的处理简单巨系统的理论和方法,推广应用于各种复杂巨系统。SFI 学派之所以感到困惑,是由于他们都是由还原论训练出来的,尽管他们已觉悟到必须超越还原论,但业已形成的思维定势,使得他们在超越还原论的路上,进展得步履维艰。显然,这主要是由于他们缺乏马克思主义哲学、辩证唯物论的科学观作指导,这就往往会陷入形而上学和机械论的泥坑。他们只着重还原论的方法,把事物还原为最小单位,孤立地用数学的方法、逻辑推理的方法以及巨型计算机,去进行定量分析,却看不到整个系统中的各种复杂的相互关系。

在同一时期,钱学森对复杂性的研究,走的却是另一条路线。他不大强调涌现概念,但主张从方法论上区分简单性与复杂性,凡是能用还原论方法处理的是简单系统,不能用还原论方法处理的是复杂系统。作为一种研究复杂巨系统问题的方法论,强调必须超越

还原论，强调基于整体现代科学技术体系，采用综合集成方法来解决问题。其实质就是利用现代信息技术，把不同领域专家掌握的专业知识、各种统计数据资料、专家的实际经验和各种直感式的体会综合集成起来，从而获得关于开放的复杂巨系统的整体定量认识。1990年初，钱学森和于景元、戴汝为共同发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》一文。1991年钱学森又作了《再谈开放的复杂巨系统》的报告。钱学森在后一报告中，正确区分了简单巨系统和复杂巨系统的概念。从现有的理论成果来看，现在建立简单巨系统学的条件要相对成熟一些，但仍有很大难度，已建构的几个理论框架，还都难以令人满意。至于作为系统学主体部分的复杂巨系统学，钱学森和他的合作者，经过多年的研究与探索，提出了只有采用综合集成方法，才有前途。

钱学森对开放的复杂巨系统的定义是："①系统本身与系统周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的交换。由于有这些交换，所以是"开放的"。②系统所包含的子系统很多，成千上万，甚至上亿万。所以是"巨系统"。③子系统的种类繁多，有几十、上百，甚至几百种。所以是'复杂的'。""过去我们讲，开放的复杂巨系统有以上三个特征。现在我想，由这三条又引伸出第四个特征；开放的复杂巨系统有许多层次。这里所谓的层次是指从我们已经认识得比较清楚的子系统到我们可以宏观观测的整个系统之间的系统结构的层次。如果只有一个层次，从整系统到子系统只有一步，那么，就可以从子系统直接综合到巨系统。我觉得，在这种情况下，还原论的方法还是适用的，现在有了电子计算机，从子系统一步综合到巨系统，这个工作是可似实现的。从前我们搞核弹，就是这么干的。""我们所说的开放复杂巨系统的一个特点是。认可观测的整体系统到子系统，层次很多，中间的层次又不认识；甚至连有几个层次也不清楚。对于这样的系统，用还原论的方法去处理就不行了。怎么办？我们在这个讨论班上找到了一个方法，即定性到定量的综合集成技术，英文译名可以是：Meta - synthetic Engineering，这是外国没有的，是我们的创造。"

"要建立开放复杂巨系统的一般理论，必须从一个一个具体的开放复杂巨系统入手。哪些系统属开放复杂巨系统呢？社会系统是一个开放复杂巨系统。除此以外，还有人脑系统、人体系统、地理系统、宇宙系统、历史（即过去的社会）系统、常温核聚变系统等等，都是开放的复杂巨系统。研究问题要从具体资料入手。只有从一个一个具体的开放复杂巨系统入手进行研究，当这些具体的开放复杂巨系统的研究成果多了，才能从中提炼出一般的开放复杂巨系统理论，形成开放的复杂巨系统学，作为系统学的一部分。20世纪50年代形成工程控制论就是采用这个办法，从一个一个自动控制技术中提炼出来的。"

三、从发扬科学的民主集中制到定性到定量的综合集成技术

钱学森曾经说过：在科学工作中，凡是提倡民主作风，学术民主发扬好的单位，科研成果就多，科学成就就大。相应的，也培养出许多科学人才，出大科学家。他常举的一个例

子是德国哥丁根大学的著名物理学海森贝格(W. Heisenberg)在20岁时,勇敢地和当时的大物理学家玻尔(N. Bohr)进行辩论的故事。另外的例子则就是同样出自哥丁根大学的卡门,把这种民主作风带到加州理工学院,以及他们师生之间进行多次友好辩论的故事。我们有这样的深刻印象:钱学森在听取有关技术问题的汇报时,他丝毫没有大科学家的架子,而把自己作为一个普通的科技人员。为了一个技术细节,如一个数据、一条曲线、一个程序或一个操作,他会和你争得面红耳赤,绝不退让,直到水落石出,才肯罢休。最后钱学森在作总结时,又表现出一个大科学家的风采。他的总结往往是来自讨论而又高于讨论,使争论双方心服口服。这就是一位科学帅才发扬科学的民主集中制的风范。

钱学森近年来在研究开放式复杂巨系统理论时,提倡的定性到定量的综合集成技术和综合集成研讨厅体系,就是这种既有民主,又有集中科研方法的升华。钱学森说:从定性到定量的综合集成技术,实际上是思维科学的一项应用技术。研究开放的复杂巨系统,一定要靠这个技术,因为首先要处理那么大量的信息、知识。信息量之大,难以想象,哪一个信息也不能漏掉,因为也许那就是一个重要的信息。情报信息的综合,这是首先遇到的问题。过去我在情报会议上讲过一个词,叫资料、信息的"激活",即把大量库存的信息变成有针对性的"活情报"。我们在做定性的工作中,一开始就要综合大量的信息资料,这个工作就要用知识工程,而且一定要用知识工程,因为信息量太大了,光靠手工是无法完成的。如果综合集成研讨厅采用了人机结合和人机交互的先进技术手段,就可能做到古人说的:"集其大成"了。这就必然使我们的知识和智慧,上升到一个新的层次。这就是钱学森说的:"集大成,出智慧"。钱学森把这种定性到定量的综合集成技术又称之为大成智慧工程。

这样的大成智慧工程,实际上是把计算机的信息处理与人脑的信息处理两者密切结合起来,形成一个人为的开放的复杂巨系统。这个系统可以拓宽人们的视野,使人接触、了解广泛的知识、经验,"感受到从前不能感受到的东西:大至宇宙,小至分子、原子,人都能审视感触!"面对这样的工作环境,老一套的工作方法与思维方式就不适应了,只有把钱学森提倡的大跨度的思维方式、整体的思维方式、综合集成的思维方式、逻辑与非逻辑相结合的思维方式、灵感的思维方式等多种唯物辩证的思维方式有效地结合起来,充分启发、引发、推动,发挥其互相补充、互相促进的作用,才可能比较准确地把握各种复杂事物的现象与本质、微观与宏观、部分与整体、稳定与发展等辨证关系,做到在定方针时居高远望,统揽全局,抓住关键;在制定行动计划时又注意到一切因素,重视细节,使决策既具有战略意义又符合实际,有所前进,有所创新。

钱学森近年来十分关注信息技术的发展。他认为具有较高文化素养,拥有广博科学知识的人群,如果经常人—机结合地进行工作,将使人的智能发展到一个新的阶段,大大提高人的创造思维能力,甚至可能出现智能革命。近年来,由于信息技术的发展,电子计

算机、互联网（Internet)、多媒体(Multimedia)、虚拟现实技术(Virtual Reality)、数据库中的知识发现(KDD:Knowledge Discovery in Databases)、数据挖掘(Data Mining)等的高速发展与普及，为我们进行创造性地思维与工作，提供了前所未有的良好条件。组成人机结合、人机互动的体系势在必行。这个体系涉及到机器学习、模式识别、统计学、智能数据库、知识获取、数据可视化、高性能计算、专家系统等多个领域。这个体系就是钱学森所提倡的从定性到定量综合集成法的最大特点。

运用从定性到定量综合集成法的集体，钱学森称之为“总体设计部”。这种总体设计部，是各行各业、各个方面、各级领导机构进行战略部署、解决开放复杂巨系统问题的参谋部。多年来，有些单位已在试行，并取得较好效果。作为大成智慧工程具体应用的总体设计部，其初型来自航空航天系统工程，当然也适用于高科技的设计、开发与产业化。1994年春天，钱学森回想飞机、火箭、导弹的总体设计与研制过程时说：高新技术的设计开发工作，也是人—机综合的大成智慧工程，因为：

(1) 把整个设计开发工作分解为几个局部问题，每一局部问题，如在马赫数8以上的超声速燃烧冲压发动机，如气动力问题、结构问题、结构防热问题等等。

(2) 再把某一局部问题分解为不同时刻的瞬时过程，如超声速燃烧的瞬时实验模拟，用1/100 ~1/10 s；用两种研究方法：计算机模拟及实验模拟，以验证计算、考核理论。

(3) 所有局部问题都经过实验证实，得到可靠的理论计算方法了，就可以综合了。

(4) 综合主要用计算机、计算机模拟全机全飞行过程，满意了，再进入全工程的真实实物试运转。这最后一段工作是耗资巨大的，力求一次成功。

四、结束语

钱学森在科学技术上的起步是从力学开始的。他为什么会从一个力学家而发展成为一个系统科学家呢？我们首先从力学(mechanics)的定义出发，根据 Longman Dictionary of Contemporary English，1978，mechanics 的定义为：

(1) The science of the action of forces on objects;

(2) The science of making machines;

(3) The ways of producing or doing.

从第三个含义上来说，它和系统学的方法就非常接近了。从这个意义上说，钱学森从一个杰出的力学家，发展成为一个杰出的系统科学家，决不是偶然的。这一方面是钱学森能够适应科学的不断发展，不断进取，不断开拓；另一方面是力学的土壤，为钱学森提供了丰富的营养，如跨声速流动和高超声速流动的非线性和湍流的复杂性，在钱学森发展系统科学中都起到了作用。当然，系统科学的发展也将促进力学的进一步发展。20世纪的力学主要致力于质量、动量和能量传递规律的研究，21世纪这种研究将延伸到信息传递领

域。信息传递本身具有很强的非线性。而对许多复杂、高维、非线性的巨系统,信息传递将和质量、动量和能量传递耦合在一起。非线性动力系统的运动形态,大的决不是小的简单放大;系统也不是部分的简单迭加。更有甚者,初始和环境条件的微小变化,可导致后来完全不确定的运动,如湍流、混沌等。揭示这类系统中信息传递的基本规律,是21世纪的力学一个关键任务。例如对于湍流的研究,在研究清楚上述信息传递的非线性规律之后,人类将从预测走向控制,并从被动控制进一步走向主动控制。

无疑,21世纪人类社会的发展将迈向新的宏大目标,从而给力学和系统科学的发展,提供新的发展机遇和提出新的挑战。力学和系统科学与中国有不解之缘。光辉灿烂的历史与文化,巨大人口的社会和广泛的现代化建设实践,有取之不尽的科学研究命题,是发展力学和系统科学的肥沃土壤。中国力学和系统科学界,应该也能够为我国科学技术的兴旺发达做出自己的贡献。力学和系统科学的相互促进,一定会迎来人类科学技术发展的一个新的百年辉煌。

钱学森从简单系统的定量分析到复杂系统的综合集成的过程中,永远站在学术的风口浪尖,勇于开拓,勇于进取,从而取得了举世公认的杰出成就,为祖国争得了荣誉和骄傲。但他从不把这一切,看成是个人的成功,而是归功于集体,归功于"中国人"。20世纪80年代末期,他的一位朋友送他一帧《咏竹》的条幅:"未出土时先有节,待到凌云更虚心。"这就是对钱学森高尚品德的生动写照。在这里,我们谨祝钱学森健康长寿,生命之树常青!

参考文献

1 钱学森. 钱学森文集. 1938~1956. 北京:科学出版社,1991

2 Tsien HS. Engineering Cybernetics. New York:McGraw-Hill Book company,1954

3 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 文汇报,1978-9-27

4 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990(1):3~10

作者简介:庄逢甘 1946年毕业于上海交通大学航空工程系,留校任助教。1947年赴美国加州理工学院攻读航空工程和数学。1950年6月以优异成绩获博士学位(Ph.D. Magna cum laude),留校任 Research Fellow. 旋即回国。1951 ~ 1953年任中国科学院数学研究所副研究员兼北京大学物理系副教授,1953~1956年任哈尔滨军事工程学院空军工程系教授,1956年调国防部五院工作,先后历任空气动力研究所副所长、所长,五院三分院副院长,七机部一院副院长兼空气动力研究所所长,国防科委二十九基地副司令员,七机部和航天部总工程师,航空航天部科技委副主任,中国航天工业总公司科技委常务副主任,1980年当选中国科学院学部委员,现任中国航天科技集团公司科技委主任及中国航天机电集团公司高级技术顾问。长期从事导弹、火箭,再入飞行器空气动力学方面的研究试验和计算空气动力学的研

究工作。主持我国空气动力学的试验研究基地及许多重要风洞试验设备建设，对高超音速再入体热防护理论研究获实际应用、研究发展风洞实验技术特别是非定常实验技术。1989 ~ 1998 年期间连续两届主持自然科学基金重大项目旋涡、分离的流动机理与控制，均圆满完成任务，鉴定结论认为达到国际先进水平，部分工作为国际领先。曾获国家科技进步特等奖(液体运载火箭)为主要完成人之一。国家科技进步二等奖及三等奖各一次，均为第一完成人。国家发明三等奖一次，国际航空理事会古根海姆奖。美国中国工程师学会突出成就奖等。现任中国空气动力学会名誉理事长，九届全国政协常委。曾任三届全国人大代表，五届全国政协委员，八届全国政协常委，三届、四届及五届中国科协副主席。发表(含与他人合作)论文六十余篇，已培养博士生 7 名，博士后 3 名。

黄志澄　1937 年 2 月 8 日出生，1958 年毕业于北京航空学院飞机设计系。长期从事航天力学和航天系统工程的研究、实验工作。1987 ~ 1992 年任国家高技术计划航天领域专家委员会委员。1993 ~ 1997 年任国家高技术计划航天领域综合专家组组长。现为北京系统工程研究所研究员，中国科学院力学研究所兼职研究员。在国内外期刊上发表论文 150 多篇，出版专著《航天空气动力学》、《高超声速飞行器空气动力学》、《载人航天发展展望》等。

专 家 文 选

钱学森与管理科学

成思危

钱学森教授是我国有杰出贡献的科学家,也是世界著名的系统工程专家。数十年来,钱老不仅在我国的国防及经济建设方面做出了卓越的贡献,而且在系统理论、系统工程以及自然科学和社会科学的许多方面也都提出了一系列重要的观点,对结合中国国情发展我国的科学技术及管理起到了巨大的推动作用。

笔者在1988年担任全国政协科技委员会委员后才认识钱老,当时钱老是科技委员会的主任,钱三强等为副主任。记得第一次参加会议时,面对一群闻名已久的科学家,在发言时实在感到有些紧张。钱老不但认真听取了笔者的发言,在以后几次会议中,还特意要笔者坐到他身边,以便能听清说话,有时还与笔者低声交谈。这使笔者感到他是一位平易近人的老前辈,开始与他交往并通信。此后十几年中从钱老处获益良多,现仅就个人的所见所闻、所思所虑,对钱老在管理科学方面的思想和贡献谈几点粗浅的体会。

一、钱老是一位思想家

笔者认为,钱老之所以能在许多方面做出重大贡献,是因为他具有思想家的高贵品质。这种品质主要表现在以下几个方面。

(1)善于学习,兼容并蓄,勤于思考,抓住本质。钱老非常关注各个方面的新情况和新知识,并善于将这些情况和知识系统化,经过他的认真思考,抓住事物的本质。在他的讲话及文章中常常具有独到的见解,有时一语破的,令人茅塞顿开。

(2)在知识结构上,钱老有专业的深度、学科的广度、哲学的高度,以及敏锐的远见这种四维结构。他不仅像一般的专家那样"务于精纯",而且还能"观其大略",可以说是藏精纯于大略之中。

(3)看问题时既见树木,又见森林,善于将微观与宏观结合起来,既能深入分析,又能综合集成。

(4)学而不厌,诲人不倦,热心奖掖后进。

钱老从一个热爱祖国的科学家成长为一个放眼世界的思想家,经历了漫长的求索过程。据笔者个人粗浅的研究,这一过程大体上可以分为三个阶段。

第一阶段大体是在20世纪60年代以前。那时钱学森基本上是一个热爱祖国的科学技术专家,在工程控制论等专业方面已取得了世界一流的成就,并冲破重重困难回到祖

国,以实现其科技报国的愿望。

第二阶段大体上从 20 世纪 60 年代初期到 80 年代初期,他在回国后一方面受到党和国家的重用,走上了领导科技研究及研制的岗位;另一方面开始接触并深入学习马克思主义哲学,并结合他自身的实践经验来体会及思考。这就促使他逐渐由一位科技专家向组织管理专家转变,并从 20 世纪 80 年代初期关注科学研究工作的组织管理到 1978 年提出系统工程是组织管理的技术。这时钱老已经敏锐地认识到管理科学对于我国的发展和振兴的极端重要性,并努力将系统工程的应用推向各个方面。

第三阶段大体上从 20 世纪 80 年代开始至今。在改革开放的大潮中,一方面有许多新事物不断涌现,社会、经济、科技发展中的复杂性与日俱增,需要他认真研究和思考;另一方面也由于与国外的接触增多,获得了大量的信息,使他能更准确、及时、全面地把握世界发展变化的情况及科技文化成果,将中国的发展放到世界这一大环境下来观察。这就使钱老更进一步从国家的全局和长远的发展来考虑问题,致力于研究更好地管理国家的方法。他不仅提出了"要从整体上考虑并解决问题"、"开放的复杂巨系统及其方法论"、"从定性到定量的综合集成"、"总体设计部"等理论及方法,而且在政治、经济、科技、文化、教育等许多方面都有许多精辟的论述,从而成为我国当代一位著名的思想家。

笔者认为,只有从思想家这个角度来观察钱老并研读他的论著,才能真正理解钱老在管理科学等方面思想的系统性和超前性。

二、发展管理科学的关键在于提高认识

笔者在 1997 年向他请教如何发展我国管理科学时,他一针见血地指出,发展管理科学首先要提高思想认识,这一论断至今还有重要的现实意义。

管理是指管理者在不断变化的客观环境下,设法运用人力、物资、设备、信息等各类资源,来达到预定目标的各种活动和全部过程。管理是生产力中的软件,只有通过管理才能将劳动者、劳动工具和劳动对象这三个要素合理地组织起来,推动生产力的发展。也只有通过管理才能将科学技术真正转化为生产力,实现科技与经济的结合。

管理既有科学的规律可循,又有艺术的运用之妙。管理科学是研究管理过程中的带有普遍性的客观规律的科学,例如,严密计划、定量计算、全面评价、优化决策等;但在具体管理活动中除了需要运用管理科学知识之外,更重要的是要求管理者发挥随机应变、周密算计、经验判断、当机立断等能力来具体地解决带有个性的具体问题。因此,我们既要认识到管理科学的重要性,又要认识到管理科学的局限性。

管理科学家的职责是探寻管理的科学规律,以帮助管理者更好地达到其目标,但其本身并不一定是优秀的管理者,正如伟大的文学家多半不是文学系的毕业生,而奥林匹克冠军绝大多数不是体育科学家。因此社会各界对管理科学家的期望应当恰如其分,也不应

随便给一些成功的企业家戴上管理科学家的桂冠。

管理科学的局限性还在于它难以精确地分析和判断人的行为,特别是一些非理性行为,以及非制度因素的影响;也难以精确地预测环境的变化。因此,管理科学虽然能提供科学的方法和手段,但由于受环境和人的制约,并不能保证管理的成功。何况管理科学家只是支持管理者的决策,并不能代替管理者决策。这一方面是因为管理科学家往往受到知识、经验、时间、环境等等方面的限制,很难保证其研究结论完全正确;另一方面则由于管理者在视野、价值观、风险性判断等方面与管理科学家有所不同,不可能也不应该要求管理者完全按照管理科学家的意见进行决策。由此可见,在决策过程中最终还要依靠管理者的智慧、胆识、决心和魄力。

我国是古代文明的发源地之一,在哲学、文学与科学技术等方面都有过辉煌的时期,对世界文明的发展也有一定的影响。但由于长期与外部世界联系不多,特别是清朝在建立全国政权之后,厉行闭关锁国政策,丧失了吸收西方文艺复兴时期以后迅速发展的科学技术与文化(包括管理理论与方法)的机遇。鸦片战争之后,虽然有了向西方学习的机会,但由于长期的外侮内患,并没有对西方进行过全面、系统、深入的研究。特别是在管理科学方面,由于种种原因,长期受到忽视和轻视,直到20世纪80年代初才开始将学习西方管理科学和培养管理人员的任务提上日程。

面临21世纪的挑战,发展管理科学更是当务之急。但是,在发展我国的管理科学方面首要的关键何在?有人认为应当认真学习西方的管理理论和方法,有人认为应当深入研究中国古代的管理思想,还有人认为应当总结中国企业的管理经验并进行案例研究,确实是众说纷纭,莫衷一是。钱老在与笔者谈话时充分强调了管理科学的重要性。他说:“管理科学是密切联系实际的一门科学,它有很大的作用。它一旦起作用,就了不起,就会出现很大的变化。”但同时又一针见血地指出:“现在管理落后的问题还不是一个科学技术问题,而是一个思想认识问题。”并且进一步明确指出加强管理首先在于提高领导者的思想认识。他说:“例如,邯郸钢铁厂的领导解决了这个思想问题,你看他们找出了一个计算方法:市场销售价等于成本加上应得的利润,这就是生产最起码要达到的目标。然后发动全厂讨论,统一认识,最后将任务落实到每个车间,以至每个人。这是领导思想上的彻底改变。”为此钱老认为重要的问题是教育干部。他说:“我看还有一个很重要的工作就是要大力宣传,教育我们的干部。我们的许多干部不是不好,而是不懂管理科学,习惯了的那老一套确实不行。所以要多向他们宣传管理科学。”

钱老还指出了在市场经济条件下运用典型经验的重要性。他说:“过去我们搞两弹时,也用到了系统工程,但那时用的完全是计划经济体制下的系统工程,比较好办。上面给我一个任务,要求在一定的期限内完成,我就把任务层层分解,保证各个方面的工作要衔接。然后到具体实施时,加强检查,哪个地方落后了,就赶快报告解决。这完全是用计

划经济的方式来解决问题，那就是由领导来决策，限定什么时间完成，就什么时间完成。用的虽是系统工程方法，但完全是计划经济下的那一套。现在市场经济条件下，该怎么搞？这个问题要用新的典型，像邯郸钢铁厂、宝山钢铁厂等，好好总结一下，再推而广之。这就是说我们搞科学研究，就是要使我们科学研究的方法能被各级领导认识到。”

今天重温钱老在4年前的这番谈话，确实感到他的语重心长。笔者在对西部大开发进行调查研究的过程中，深感首要的关键是提高西部地区广大干部的政治责任心、历史使命感、政策水平和决策能力，单靠增加投资和发展科技是难以达到振兴西部的目标的。

三、强调系统工程在组织管理方面的作用

国外早期的系统工程论著多半着重于技术系统的分析与设计，而钱老则强调系统工程是组织管理的技术。他早在1978年就已指出：“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法”。1986年7月，在全国软科学研究工作座谈会上，钱老又进一步指出：“国家是个大的系统，要使这个系统达到最优的状态，有几个方面的工作要做。我认为社会主义国家有八个方面的功能……这就是建设我们中国社会主义的学问。这学问实际上是应用科学，它具体到怎么去管理这个国家，用什么方法预测、管理、组织这些问题，是系统工程，或是软科学。”他的这些论断推动了我国的系统工程研究与实践进一步向管理科学及软科学方面延伸，更加注意研究包含人为事物的系统，如企业系统、经济系统及社会系统等。此后钱老又提出了开放的复杂巨系统的概念，以及从定性到定量的综合集成方法，为研究这类系统提供了理论及工具。

为了使系统工程的理论与方法更加深入人心，真正成为改造客观世界的有力工具，钱老一直注意拓展系统工程的应用领域。据笔者所知，中国系统工程学会的许多专业委员会都是在钱老的倡导下建立起来的。1988年12月23日，钱老在给笔者的信中提出：“我想中国系统工程学会似尚缺少一个专门搞生产流程的委员会，而生产流程的系统工程对化学工业特别重要。您如同意，您可作为发起人向学会的秘书长或副秘书长建议成立这个委员会。”在钱老的推动下，12个部委于1991年联合建立了中国系统工程学会过程系统工程专业委员会。该委员会对在化工、冶金、轻工、建材等过程工业中研究开发与推广应用过程模拟及优化，过程综合与过程管理等过程系统工程技术，提高过程工业的生产技术水平及集约化程度等方面都起到了一定的作用。

四、提倡从整体上考虑并解决问题

作为系统工程专家，钱老一贯提倡要从整体上考虑并解决问题，反对部门分割及地方分割。他在1990年时指出：“现在我们的社会形态距理想实在太远了。我不是说一项一项

的具体事情,一项一项的成绩是很大的。但是从整体上说,浪费太厉害了,效率太低了。这实在令人担忧。我们一定要治理整顿,深化改革,而这里最重要的是要从整体上考虑,而不是就个别的问题而言。"1991 年 3 月 22 日,钱老在全国政协科技委员会第二次全体扩大会议上的讲话指出:"我觉得,对于当前我国的科技、经济、政治、国防要统一起来考虑,要有长远的、宏观的、战略的眼光。现在是一些长远的、宏观的、战略的看法,得不到应有的重视。"1993 年 2 月,笔者陪同顾秀莲同志去拜访钱老时,他又指出:"现在部门分割、地方分割的问题严重,不易解决。我和成思危同志谈过,要搞大化工。……要打破部门界限,把能源、冶金、生物等方面都结合起来。"1997 年 7 月 2 日笔者去拜访钱老时,他明确地提出:"中国的情况是部门分割严重,所以最重要的工作是向中央提供一个分析结果,报告由于部门分割所带来的损失,这也许是我们社会主义建设向前推进中的最大问题。如果国家自然科学基金委员会能够提出这样的一个报告,我想会有很大的作用,肯定能够得到中央的重视。因为他们也了解这些情况,但我们到底损失有多大,需要科学地估计一下才行。" 笔者认为钱老的这一建议十分重要,也曾力图着手落实,但由于困难重重,举步维艰,至今未能实现。

五、推动自然科学与社会科学结合

钱老十分推崇马克思就自然科学与关于人类的科学将会成为一个科学的预言,并称这一过程为自然科学与社会科学的一体化。他在 1991 年 4 月 13 日给笔者的信中说:"您论科学技术为第一生产力的文章很好,宜早日发表以帮助大家提高认识。我只想到一点:科学技术不只是自然科学工程技术,还有社会科学、软科学。"在 1997 年 7 月 2 日的谈话中,钱老又提出:"有些涉及到用社会科学来解决管理科学与自然科学之间的问题,就要找一找社会科学家。……就是要找那些现在具体在做工作,又能接受管理科学这个概念的,在科学技术工程界和社会科学界之间建立联盟。"在钱老的影响下,我国系统工程界的一些学者开始注意学习社会科学知识,并与社会科学家联合研究一些软科学及管理科学问题,且已取得了一些成果,例如"国家 12 个重要领域技术政策的研究"、"人口系统定量研究及其应用"等。

从科学的发展历史中可以看出,在科学处于萌芽阶段的古代文明中,科学是一个统一的体系。作为古代科学代表人物的亚里士多德,就是将哲学、自然科学与社会科学综合在一起而建立了一个包括哲学、天文学、物理学、动物学、植物学、逻辑学、政治学、美学等等方面的体系。以后哲学逐渐独立出来,并被迫披上了神学的外衣,而科学的发展也由于受到社会政治动乱的干扰和宗教意识形态的压制,长期处于基本上停滞的状态,仅在中国及阿拉伯国家取得了一些进步。直至 15 世纪下半叶,在西方文艺复兴运动的推动下,随着社会的进步和生产的发展,科学才逐渐分化为自然科学与社会科学两大部类,而每一部类

又逐渐分化为各门学科，这一过程直到 18 世纪才基本完成，并分别形成了自然科学与社会科学两大科学体系。这一科学分化的过程至今仍在继续，并已经形成了自然科学、技术科学、社会科学与人文科学四大部类。

在科学不断分化的同时，科学的融合过程也在悄然兴起。一是同一科学部类内部的有关学科之间的相互交叉与渗透，产生了例如物理化学、生物统计、射电天文、经济地理等学科；二是不同部类的有关学科之间的相互交叉与渗透，产生了例如数理经济、社会生物、计量历史等学科；三是由于科学与技术的紧密结合，使得许多学科实现了工程化，产生了例如化学工程、生物工程、知识工程、金融工程等学科；四是近数十年来出现了系统论、控制论、信息论、协同论、突变论、耗散结构论、超循环论、混沌理论等一批“横断”学科，它们所发现的一般规律正在越来越多的学科中得到应用；五是由于科学研究活动的群体化及社会化程度不断提高，以及数学模型及计算机的普遍应用，自然科学家要学习经济与管理知识，而社会科学家则要学习数学与计算机知识，双方的相互了解日益增多。目前这一融合过程还在继续并不断增强，最后将会在此基础上实现新的综合，进而实现科学的融合。

实现科学融合的哲学基础是客观世界的系统性，即客观世界是一个由相互联系的各部分所组成的、不断发展变化的系统。由于每一门学科的研究对象仅是这一系统中的一小部分，因此在研究过程中决不能忽视其研究对象与系统其他部分的联系。而只有将各门学科及各学科部类的研究成果综合集成起来，才能取得对客观世界的全面认识。著名物理学家普朗克早就指出：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条。”近年来，一些有识之士不断大力倡导和推进跨学科研究。1984 年，在诺贝尔奖获得者 Murray Gell - Mann、Philip Anderson、Kenneth Arrow 等人的支持下，聚集了一批从事物理、经济、理论生物、计算机等学科的研究人员，组织了桑塔费研究所(Santa Fe Institute，简称 SFI)，专门从事复杂科学的研究，试图由此找到一条通过学科间的融合来解决复杂性问题的道路。

但是，应当看到，实现科学融合是一个长期的、艰巨的，有时甚至是痛苦的过程。由于各门学科的研究对象、发展历程、研究方法等方面的不同，再加上长期以来的学科分割、“隔行如隔山”、“文人相轻”等主观因素，以及缺乏人才、技术及经费等客观因素，使得学科之间的综合集成难以实现，距离科学融合的目标就更加遥远了。

近年来有些未来学家指出，由于科学发展的代价增大及科学研究中的保守倾向，科学发展的速度可能变慢，甚至出现一种知识危机，而为了获得最大限度的科学进展，至关重要的是研究科学中的方法，而不是科学中的学术。因此，我们在推进科学融合的过程中应当不断实现科学方法的创新。

根据辩证唯物主义的观点，人类对客观世界的认识来自于以人类的生产活动为主的

社会实践,并且会随着社会实践的发展而不断深化,即由浅入深、由表及里、由个体到整体、由部分到系统。自20世纪初以来,由于社会实践的广度和深度的迅速扩展,以及科学技术的高度发展,人们对客观世界的系统性及系统的复杂性的认识也更加全面而深入。笔者认为,这种认识可以概括为以下几个方面的结合(辩证的统一):微观与宏观的结合,层次结构与功能结构的结合,静态与动态的结合,系统与环境的结合,明确性与模糊性的结合,确定性与随机性的结合,自组织与他组织的结合。

美国的一些科学家于20世纪80年代初明确提出了系统的复杂性问题。例如前述的SFI的科学家们认为,复杂系统是由大量相互作用的单元构成的系统,复杂性的研究内容则是研究复杂系统如何在一定的规则下产生有组织的行为,进而提出了复杂的适应性系统的概念。在这一思想指导下,他们集中了一批优秀的科学家进行了跨学科的研究,并已在经济系统的发展、免疫系统的形成、人工生命、人工神经网络计算等方面取得了一些初步的成果。

钱老也于1990年提出了开放的复杂巨系统的观念,并认为复杂性问题实际上是开放的复杂巨系统的动力学特性问题。在以后的几年中,他对与此有关的问题又做了许多精辟的论述。遗憾的是,由于各种客观上的原因,钱老的许多预见未能付诸实践,因而也难以用实践经验来推进开放的复杂巨系统理论的发展。经过艰苦的努力,国家自然科学基金委员会于1998年同意将"支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究"列为管理科学部的重大项目,总投入500万元,目前正在实施过程中。

六、坚持根据国情发展管理科学

钱老曾尖锐地指出:"我们现在有一部分人,看外国的东西头晕眼花,说得不好听,就是有点迷洋崇外。应当老老实实地承认,科学技术方面,总的来说,西方某些国家比我们强,我们不要来个阿Q主义,那是很难进步的。但也不能一见外国的东西就躬身下拜,要有分析,实事求是。……我当然不是说外国的东西不要看,要看;不但要看,而且要下功夫钻研。但是,我们要去粗取精,他们也确实有精的东西。……外国的东西要虚心学习,要汲取他们好的东西,但是,千万不要盲目地跟着走。"钱老还在不同场合用一些例子来具体说明这一观点。钱老多次用我国研制"两弹一星"的实例来说明在社会主义制度下采用民主集中制时有可能做到投入少、速度快、效率高。在谈到从定性到定量的综合集成方法时,他也强调只有在社会主义制度下,由于专家们的根本利益一致,才有可能逐步实现集成。钱老的这些思想鼓励了一些系统工程工作者在努力吸收国外成就的基础上,针对我国国情独立思考,大胆创新,并已取得了一些颇有价值的成果。

中华民族有着光辉灿烂的历史与文化,其中也包括许多宝贵的管理思想和管理经验。它们经过五千年的积累与提炼,至今仍在国家和企业的管理实践中发挥着重要的作用。

对待我国古代的管理思想,我们应当采取"古为今用"的方针:一是要对其进行认真的研究与分析,有些问题还应进行认真的考证;二是要实事求是地加以评价,不要拔得过高,更不应牵强附会,须知古人因受其历史条件限制,不可能为今天的管理问题提供现成的答案;三是要联系实际进行思考,将古代管理思想中的原则与当前的具体情况结合起来;四是要将批判继承与创新发展结合起来,取其精华,去其糟粕,防止食古不化,而应在前人的基础上不断创新。

当19世纪末期西方现代管理开始兴起时,泰罗(Fredrick W. Taylor)等人强调的是科学管理,其中心是以科学方法提高劳动生产率来实现雇主的低成本要求与工人的高工资要求之间的平衡。而梅奥(Elton Mayo)等人则着重于研究人的本性和需要、行为的动机,尤其是生产中的人际关系。第二次世界大战后西方各种管理学派纷纷涌现,出现了百家争鸣的局面。我们对待五彩缤纷的现代管理理论及方法,应当坚持"洋为中用"的方针,即要在认真学习研究的基础上,吸收其精髓,有选择地结合我国的实际情况加以运用。

因此,如何将华夏文化与现代管理融合起来,在"古为今用,洋为中用,取长补短,殊途同归"的基础上,建立有中国特色的管理科学体系,确立其学科结构及重点发展领域,是我们这一代管理科学家们义不容辞的责任。

从以上一些极不完全的叙述中,可以看到钱老的思想及观点对建立有中国特色的管理科学具有重大的指导意义。但是要真正实现建立有中国特色的管理科学体系这一目标,还需要我们大家坚持不懈的努力,笔者也愿意为此而贡献自己一份绵薄的力量。

参考文献

1 成思危. 发展管理科学首先要提高思想认识——钱学森教授访谈录. 管理科学学报,1998(1):3~7

2 成思危. 管理科学的现状与展望. 管理科学学报,1998(1): 8~14

3 钱学森等. 论系统工程. 长沙:湖南科学技术出版社,1982

4 钱学森. 软科学是新兴的科学技术. 红旗杂志,1986(17):20~23

5 钱学森. 要从整体上考虑并解决问题. 人民日报,1990-12-31(3)

6 成思危. 试论科学的融合. 自然辩证法研究,1998(1):1~6

7 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990(1):3~10

8 成思危. 古为今用,洋为中用,取长补短,异途同归——论华夏文化与现代管理的融合. 管理科学学报,1998(2):1~5

9 成思危. 中国管理科学的学科结构与发展重点选择. 管理科学学报,2000(1):1~6

作者简介:成思危 1935年出生,湖南湘乡市人。全国人大常委会副委员长,国家自然科学基金委员会管理学部主任,教授。

运筹学与最优化技术

吴沧浦

一、运筹学与最优化技术的发展之间的联系

作为具有相对独立性质的学科与技术,运筹学与最优化技术,其发展过程具有密切联系,并且彼此之间在其发展中起着相辅相成的作用。在运筹学发展的初期,经典运筹学强调定量研究。这里的定量研究主要包括两个方面:其一是对于作为研究对象的运筹系统作出定量的描述,该描述可以用数学模型或仿真模型表达;其二是给出能够定量地衡量运筹系统的运作的优劣程度的效力度量,该度量必须能够明确地显示出它自身与系统的决策(控制)变量之间的依赖关系。经典运筹学之所以强调定量研究,其目的在于使决策与对于其所能选择或控制下的决策变量作出最优的选择。这里的最优是在下述的意义下理解的,即该选择能够使上述的效力度量达到最大值或最小值。由于在经典运筹学中,效力度量是以实数表示的,而且它能定量地反映运筹系统的运作的优劣程度,因而上述意义下的最优性是有意义的。由此不难理解,最优化技术成为经典运筹学中的主要工具,后者成为前者发展的主要推动力;反过来,最优化技术的发展又在运筹学经历了从经典运筹学到现代运筹学的进化中起了重大的作用。

在运筹学的奠基性专著——莫尔斯与金博尔合著的《运筹学方法》中,专门辟出一章论述效力度量的使用。人们由此可以看到最优化技术在经典运筹学中所占有的重要位置。另一方面,从国际运筹学会联合会所举办的最近两届(1996年于加拿大温哥华、1999年于中国北京)运筹学国际会议上发表的论文,以及新近出版的有关专著,例如,由美国普渡大学教授拉丁的《运筹学的最优化》及印地安那大学教授温斯顿的《运筹学:应用与算法》中,人们可以明显地看到,尽管时过半个世纪,最优化技术在现代运筹学中仍然起着举足轻重的重要作用。

二、最优化技术的发展

在文学界和艺术界,存在一种流传颇广的看法,即在文学和艺术中,存在一些“永恒”的主题,例如,善与恶之间的斗争、真理与谬误之间的斗争、人与人之间的博爱(友情、爱情等)。从类似的角度出发,或许可以说,最优化技术是科学与技术中的一个“永恒”的主题。

因为科学与技术无非是人类认识世界和改造世界的产物，而人类在认识世界和改造世界的行动过程中，在一定的主观和客观的条件下，自然而然地会要求其行为能够达到最优的效果。

事实上，最优化的思想的渊源可以追溯到人类的早期文明。早在公元前一个世纪左右之时，古埃及的科学家就曾断言光在两点之间以最短途径传播。另一富有诗意的例子是由古罗马诗人威吉尔所给出的关于迦太基皇后狄多索取领地的传奇故事，她在北非洲面临大海处索取一块领地，其面积一张牛皮即可覆盖。然后她将一张牛皮做成一根绳子，以这根绳子面对大海以半圆弧划出一块地域作为领地。在给定周长的条件下，半圆弧划出的地域的面积达到最大。早在公元前两个世纪左右，阿基米德就曾对此事实作出猜测，但是直到两千多年后发明了变分法，此一事实才得到严格的证明。

上述两个例子从一个侧面表明，作为一门科学与技术，最优化理论与最优化技术最初是在物理学和几何学的研究中得到发展的，随着欧拉—拉格朗日最小作用原理，哈密尔顿最小势能原理以及吉布斯最小自由能原理的发现，最优化理论和最优化技术在自然科学中的应用于18、19世纪间获得了辉煌的成就，相形之下，它们在包含运筹学的系统科学方面的应用的发展，却要晚得多。这一情况缘于具有实际背景的运筹学的最优化问题远比上述自然科学中的最优化问题复杂得多。线性规划与单纯形方法的创立者丹齐克在回忆他于开发单纯形方法之初在美国空军后勤部门所遇到的运筹问题的复杂性质，他在此提到的运筹问题乃一人事安排问题，即假设有70位工作人员要安排到70种不同的工作岗位上去，要求在某种线性的效力度量函数下使工作安排方案达到最优。在此问题中，可供选择的工作安排方案为70！如果以穷举法搜寻最优方案，即使使用当时计算速度最高的计算机，也需要超过150亿年的时间。另一运筹学中著名的最优化问题乃是“旅行推销商问题”，如果推销商需遍历70个地点，则可供选择的不同的旅行路线数与前一问题的方案数相同。

除去复杂程度的区别外，运筹学中的最优化问题与在自然科学中得到广泛应用的基于经典变分学的最优化问题相比较，还具有下述的重要区别。在经典变分学中，问题的最优解一般是在其邻域内的相对最优解，由于问题的实际背景的特点，此相对最优解通常也是问题的全局最优解。例如，对经典变分学的研究起到推动作用，于欧洲文艺复兴后期被提出的著名的“最速下降线”问题就是如此。伽利略曾作出该问题的最优解是圆弧的猜测，但直到变分学出现之后，它的最优解才被严格证明为摆线而非圆弧。在运筹学中，最优化问题的解一般 是在全部可行解(满足问题的约束条件的解，亦称满足约束解)的集合中达到最优的全局最优解。例如，在动态规划理论中建立起来的哈密尔顿—雅可比—贝尔曼方程以及与其关联的庞特里雅金最大值原理，就给出了全局最优解所须满足的条件。

有一些早期的最优化技术的学者认为，如果效力变量不是一个实数，而是出现同时存

在若干以实数表示的效力度量,且彼此间存在矛盾,即决策变量的变动可能使某些变量下降而其他上升,或者相反,则这类问题不可能被进行最优化。多目标最优化技术的出现,彻底改变了这种情况。多目标最优化的思想起源于19世纪帕雷托在经济学上的研究,但它形成比较成熟的理论和完整的技术,却是在20世纪70年代以后。由于帕雷托最优性的思想具有很强的理性基础,它已成为多目标最优化中的最通用的基本概念。多目标最优化的特征是它的目标(效力度量)空间是多维欧氏空间,或许因为有些多目标最优化的解是通化将其化成单指标最优化问题,因而使某些学者存在错觉,认为前者只是后者的在多维空间的简单推广。事实并非如此,两者具有实质上的区别。在单指标情况下,解空间到度量最优值是一解集到实数集上一点的映射,求最优解是此映射的逆映射,它是一点集映射;而在多指标情况下,解空间到度量最优值是一解集到多维欧氏空间上一集的映射,该逆映射是集—集映射。此情况使集—集映射成为多目标最优技术中的重复工具。此外,现代的研究已将目标空间扩展为一般的函数空间中。

与多目标最优化密切关联的是多人(决策者)决策问题,此处最优化的概念又有所不同,它要达到多人效益的平衡。J. von Neumawn 的专著《博奕论与经济行为》是该领域的奠基著作。多目标和多人决策最优化问题的出现标志着最优化技术进入人类社会活动的重要领域——人类的经济行为。

运筹学中有不少问题是无法建立模型的,不论是数学的或仿真的。为适应此情况,最优化技术发展出一系列无模型情况下的方法。一个最简单情况就是菲波那契搜索法与黄金分割搜索法。这是极接近于无模型的方法。因它除对变量的函数作出单峰的要求外,不需该函数的其他信息。许多启发或搜索法也具有类似性质。特别值得一提的是,近来发展起来的智能计算方法诸如遗传算法、进化算法、进化规划等,更是可以完全脱离模型的最优化技术。

在运筹学的最优化问题中,通常会出现一些由决策者考虑其他因素时所出现的问题描述(包括模型)中包含的参数,这些参数也可以是环境变动或问题描述的不精确性所引入的。在这种情况下,研究这些参数的微小变动对最优解的影响就显得很重要。近代最优化技术引入的灵敏度分析,对于决策者采用最优化技术成果时具有重要作用,它可使决策者在环境变动或问题描述不精确时,有更大的回旋余地以作出决策。

现代最优化技术的最显著特点是它的多学科跨学科性,除去运筹学外,它与系统工程、人工智能、模式识别、知识工程等学科的发展联系密切,并在发展过程中起着相辅相成的作用。其中尤其重要的是与人工智能的联系。除去以上的智能计算外,以霍费尔为先驱的神经网络最优化方法的工作,以沃特金与伯契卡斯为先驱的机器学习最优化方法的工作,为现代的最优化技术开辟了一个极高前景的广阔领域,这一点从新近出版的来翁德斯的专著《最优化技术》可以明显地看出来。

三、运筹学的发展

在西方国家,如果从运筹学的酝酿(1935 年)算起,至今已有 66 年时间,但是多数研究运筹学的学者认为,从国际上学术界的运筹工作的广度和深度看,运筹学作为一门独立学科出现,还是从 20 世纪 60 年代开始的。我国的运筹学研究工作,是由钱学森先生于 1956 年在中国科学院力学研究所建立运筹学研究室开始的,钱先生以其敏锐的科学洞察力和远大的眼光,在西方运筹学发展的初期就将它引进我国,为我国运筹学的发展做出了重大贡献。因为有了这样快速的引进,我国的运筹学发展与西方比较,可以说差不多是同步的。目前我国运筹学工作者的队伍规模比西方国家的规模大,在研究工作方面我国也有不少成果处于国际前沿。

从运筹学成为一门独立学科之后,运筹学的研究内容已经经历过重大的变化。在经典运筹学中,决策者并不包含在运筹学的研究对象之中,决策者是运筹学提供其研究成果的对象,即运筹学工作者的客户。自从人机交互形式的决策支持系统的研究出现以来,决策者与其提供决策根据的进行系统分析的工具(计算机和计算机网络)一起,整个地形成运筹学的研究对象,决策者已被包含在运筹学的研究对象之中。新近出现的研究专题“组织化智能”,已将决策者、专家、计算机及其网络一起,以及它们之间的交互作用,整个地形成运筹学的研究对象。

可以这么认为,作为一门科学的运筹学,随着整个科学技术的进步而不断进行自身的进化。尤其因为它具有多学科、跨学科的特点,它的进化将具有如下特点:它在新学科或新技术中找到新的生长点,它从其应用背景的新需要中得到其扩展研究领域的推动力,它随新的硬件工具或装置的出现得到其扩展研究领域的基础。运筹学的研究核心是决策,而决策是人类智能活动的高级形式。因之,运筹学的发展无疑将与智能科学的发展密切相关,这与最优化技术的未来发展动向是一致的。

四、结　论

当前世界经济的发展特点,一是知识经济的未来主导地位,二是经济全球化。运筹学与最优化技术的发展,必然与此特点相适应。新发展起来的高科技,将成为面临新世纪的经济发展的主要推动力。因此,与这些高科技紧密结合,无疑是运筹学与最优化技术在新世纪里的发展方向。

参考文献

1 莫尔斯·金博尔.运筹学方法.北京:科学出版社,1988

2 Ravclin R R. Optimization in Operations Research Prentice Hall New Jersey. 1998

3 Winston W W. Operations Research : Applications and Algorithms , Duxburg press , Belmont , CA. USA. 1994

4 Leondes C T. Optimization Techniqwes Academic Press , San Diego , 1998

5 Nocedal J. Wright S J. Numerical Optimization , Springer , Berlin ,1999

6 Ehrgott E. Multicriteria Optinization Springer , Berlin,2000

7 吴沧浦.运筹学的进化.运筹通讯, 2000,10(2):11～13

作者简介:吴沧浦 1932年12月出生,福建晋江人。1952年清华大学本科毕业。1962年中国科学院研究生毕业。1978年起任北京工业学院(后改北京理工大学)副教授,1981年起任北京理工大学教授。曾任国务院学位委员会学科评议组成员,国家自然科学基金委员会评议组成员,国家教委科技委学科组成员,中国运筹学会副理事长等学术兼职。

钱学森先生与计算力学

钱令希

一、计算力学

钱先生于1955年归国后不久,在中国力学学会的一次年会上发表了《论技术科学》的演讲,不仅为力学界开拓了眼界,引导了努力方向,而且在全国科技界产生了深远影响。每次重温这篇在《科学通报》1957年第4期上发表的论文,常有新的领悟。

有一次我曾写信请教,"技术科学"这词在英文中应如何翻译,钱先生回信说,可译成"Engineering Science"。我领会"技术科学"就是为工程技术提供理论基础的科学,以建设有科学基础的工程技术。它不是自然科学本身,也不是工程技术本身,它是介乎自然科学和工程技术之间,促成两者的综合,也可以说是两者之间的桥梁。人类进步,有认识世界和改造世界两方面的任务,由自然科学和工程技术分工承担。但分工又必须综合,才能有效地向前进步和发展。技术科学就是从综合自然科学和工程技术,并为双方服务所产生出来的。它的综合与服务亦有利于自身的发展与创新,并做出有技术科学特色的贡献。

钱先生以力学为例论述了应用力学这门典型技术科学的产生。它以经典力学为基础,为航空技术创造性地解决一系列关键工程理论,为人类航空航天技术做出历史性的辉煌贡献。应用力学是在经典力学发展到相当完整的时候,联系生产实际而形成发展为近代力学。

钱先生于1961年在《人民日报》上发表了一篇重要文章《近代力学的内容和任务》。文章指出近代力学的内容一般分做三个领域:一般力学、固体力学和流体力学。近代力学的任务具体说来有三项:第一,为工程师、设计师服务,帮助他们解决生产实践中的问题。第二,从生产实践中提炼出具有一般性的课题作为新的力学理论来研究。第三,是创新,提出新的科学创见,改进工程技术,改造生产。他指出,十分明显,近代力学离开了理论基础就解决不了问题,而离开了生产实践就将失去其生命力。这篇文章对于当时各大学纷纷成立的力学系起到重要的指导作用。

他随后又在1978年发表一篇题为《现代力学》的文章。那时国际上电子计算机早已进入科学技术各个领域,而我国由于"文化大革命"而落后了很多。文章强调"必须明确要把电子计算机和力学工作结合起来,不然就不是现代力学,就不是现代化,就不能说以70年

代世界先进水平作为我们的起点”。

我是由从事土木工程转向结构力学的教学和研究的。早年,结构力学要解决工程问题必须得出数字结果,总是碰到“算”这个难题。不得不先把问题简化,但又不能离实际太远,两者很难兼顾,这方面花费了很大精力,还常常得不到满意的结果。钱先生在 1955 年 11 月,即在他归国后的第二个月来东北考察时就对我预言,电子计算机将使科学工作从计算困境中解放出来,要跟上时代,掌握计算机,把它用在力学工作,你经历的计算困难就不在话下了。我听了很兴奋。但当时,我们还没有接触计算机,还不大能理解。后来,1958 年,听说钱先生在北京中国力学研究所建议用计算机解百万千瓦水轮机的流体力学问题。这鼓舞我们也在 20 世纪 60 年代初用手编程序计算潜艇加肋锥柱结合耐压壳的稳定性问题,尝到了甜头。那时国际上出现了有限元数值分析方法和计算机的高级语言,引发了力学工作者学习计算机的热情,去解决一些以前难以对付的问题。但是,不久“文化大革命”开始,一切工作都搁下了。到 20 世纪 70 年代初,人们可以重新进图书馆时,在 1973 年中国科学院组织的一次力学座谈会上,大家了解到过去几年国际上计算机推动力学发展的势头很猛,主要是有限元法的理论与计算机应用。例如结构力学领域已从结构分析扩大到结构优化设计了,这些信息引起了与会者的注意。但是“文化大革命”还在继续,直到 1978 年,中国科学院组织全国力学规划时,才着实认识到计算机对力学发展的重要影响,于是把计算力学列入规划,成为十二项课题之一。1979 年高教部在大连组织了一次全国计算力学报告会;1980 年,几个产业部门在蚌埠召开了一次全国性的有限元分析方法的报告会;1981 年机械工业部在合肥组织了一次国际性的计算力学会议,邀请到英国的 Zienkiewicz、美国的卞学璜、Oden、我国的冯康等计算力学专家做报告。不久,1981 年国际计算力学协会(IACM)成立,隶属于国际理论与应用力学协会(IUTAM),我国是协会的成员并参加了协会的发起工作。此后,计算力学在国内发展了起来,国内外学术交流比较通畅,基本与国际接了轨。

钱学森的技术科学思想和对计算力学的预见性与鼓励对这期间计算力学在我国的发展过程,具有极其深远的影响。

就我个人的工作而言,自从事工程转向力学之后,在钱先生的技术科学思想的影响下,逐渐明确了教学与科研的努力方向,并与教学同仁讨论后取得以下共识:

(1) 明确我们的力学工作是为工程技术服务的;

(2) 大家尽快掌握现代化的计算技术,建立计算力学队伍;

(3) 先掌握以有限元法为主的结构力学分析,然后转入结构优化设计的理论和应用的研究,更好地为工程建设服务。

岁月如流,从 20 世纪 70 年代开始,迄今已将近 30 年了,一支 20 余人的老中青结合的计算力学队伍起来了,成立了相关的国家重点实验室,也为工程服务做出了一些成绩。下

面就“计算结构优化”这个题目做个简单的汇报。

二、计算结构优化设计

1960年初,力学工作者接触了电子计算机,反应强烈,认为从此“计算瓶颈”可以解决。正好有限元方法已出现,工程结构分析有了很有效的途径,不必再像过去那样分别寻找各种简化的近似方法去分析不同结构在外部环境下的力学响应。结构分析的手段有了突破,自然就想到结构优化设计的可能了。但是要从结构分析迈向结构优化设计,这是很大的一步,是从线性进入非线性领域。虽然有非线性数学规划可以作为优化的有效手段,但是困难还是很多,结构优化要做多次重分析,每次分析工作量过于庞大就不现实,需要研究合理的重分析方法;由数学家研究出来的数学规划方法种类繁多,各有巧妙,但把这些方法直接应用到工程结构优化中去仍需大量的研究工作,因为联系到工程结构的实际,数学模型就比较复杂,其设计变量和约束条件的数量往往超出一般数学规划能处理的范围,特别是约束函数通常是设计变量的非线性隐函数,每次计算都要动用庞大的有限元分析,至于其梯度信息(灵敏度分析)更是困难。所以在最初试用数学规划于几个简单的桁架结构时就遇到不少困难,不免感到事与愿违。

当时,国际上在研究合理的力学近似来克服困难有不少进展,但是当时编制的软件大多是研究性的,离工程实际应用还有不小的距离。至于航空工程界,则在比较现实的基础上发展和应用各种准则法,理论上虽然不那么严谨,而应用上却比较容易实现。除了最简单直觉的满应力法,还出现了以数学规划中的库—塔克(Kuhn - Tucker)条件为基础,用来处理有变位、频率、失稳临界力等约束的理性准则法。我们那时的工作先是发现了这种理性准则法和序列线性数学规划在数值求解过程中的迭代步是相同的,因此使两种方法得到了统一;接着发现当时求解结构优化最为通用的序列线性规划(SLP)方法收敛慢,有时还不稳定,于是试探了序列二次规划(SQP),就是把目标函数做近似二次化,而约束函数保持线性化,通过迭代,收敛于原非线性规划的数值解。序列二次规划比之序列线性规划,收敛快而稳定。此外还有一个突出的优点,就是用在结构优化上,每步迭代可以自动删除无效约束,这就避免了在优化的过程中要识别有效和无效约束的困难。因此,我们决定采用序列二次规划作为优化手段,这样可以着手编制可供工程实用的软件了。针对杆系结构(主要包括桁架和刚架)的截面尺寸优化编制了取名为DDDU的优化设计系统。软件自1979年开始编制,经过十多年不断维护发展,有好几个版本,在航空、航天、机车、拖拉机及各种机械产品的结构优化中得到应用,已为一些设计单位移植。在工作过程中,需要了解和研究一些实际问题,启发我们开拓思想去研究有关的理论和方法,同时也引发我们要开发更强大的集成软件,供工程设计使用。下面简单介绍两件比较有意义的工作。

(一) 用微结构扩大设计空间,为拓扑优化创造条件

1981 年,程耿东在研究受弯薄板优化设计时,发现用传统的以薄板厚度 $h(x,y)$ 为设计变量,则只能得出具有奇异特性的局部最优解,不存在全局最优解。如果对厚度 $h(x,y)$ 给予上下界限制,则仍然不存在光滑函数的全局解。如果进一步容许 $h(x,y)$ 不光滑,则出现类似肋骨的材料集中,但是其集中的程度与分布却随计算中有限元网格剖分有关,网格越细出现肋骨现象越繁多,总之,传统的实心薄板优化的数学模型出现了反常和不稳定。从工程经验的直觉出发,实心薄板上布置一定的肋骨,是提高刚度和强度的有效办法,因此程耿东采用解析方法研究轴对称厚度分布的圆环板。除了给定厚度的 $h(r)$ 上下限之外,还设想板上具有无限密集且无限细的肋骨加强[密度为 $b(r)$],这样扩大了设计空间,居然得出收敛且稳定的优化解。这种密集肋骨可称之为微结构。当密度 $b(r)=1$,该处 $h=h_{max}$;而 $b(r)=0$,则无肋骨;若 $0<b<1$,则采用凝聚化手段布置肋骨(图 1)。

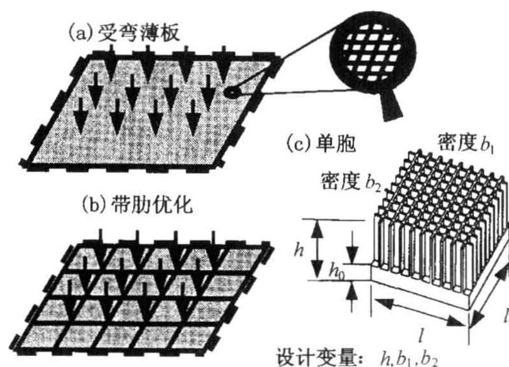


图 1 受弯薄板优化

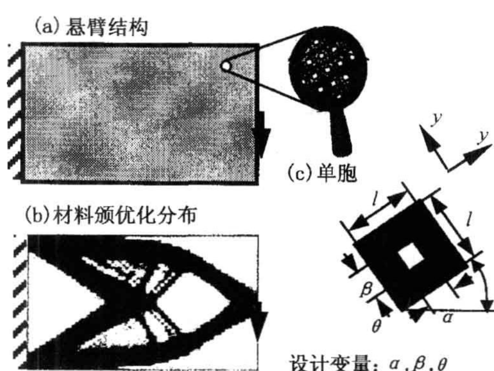


图 2 悬臂结构优化

用微结构来扩大设计空间的概念,在国际上引起相当大的反响,使人们可以设想采用具有微结构的复合材料代替传统材料来优化结构。图 2 是悬臂结构的拓扑优化,所用微结构是带孔洞的单胞,某区域单胞的孔洞大小表示该区材料密度的大小,通过优化,便可得到结构材料的优化布置。高层次的结构优化应该是跨尺度的结构与材料一体化的拓扑优化,本来这是难度很大的问题,但采用微结构的概念之后(图 2),就完全可以利用成熟的尺寸优化的办法来处理。可以说这个微结构概念有力地推动了当前结构拓扑优化的发展。

(二) 集成化软件 JIFEX

计算机产生了计算力学,软件系统的开发是计算力学最重要的工作之一,是力学为工程服务的工具。

我们在 20 世纪 70 年代就意识到必须开发国产的、有自主版权的结构分析和优化设计软件系统。当时钟万勰就投入开发大型结构分析的通用程序 JIGFEX,立志要在算法、数据

管理、结构模型化方面要有自己的特色，他的成果为此后的软件开发打下了坚实的基础。JIGFEX最突出的特点是具有多层子结构功能，这是为了符合我国国情在微机上可以处理大型复杂结构的需要。JIGFEX有一个简化的版本DDJ－W，是国内流行较广的实用结构分析软件。我们的结构优化软件就是以JIGFEX和DDJ－W作为分析子系统的。

上文提到的第一个优化设计软件DDDU的优化对象主要是杆系结构。为了进一步发展结构的形状优化功能，并扩充结构模型化、分析和优化功能，从1986年开始研制计算机辅助结构优化设计软件MCADS，1991年将优化软件MCADS和分析软件JIGFEX、DDJ－W一起集成化为结构分析和优化设计系统JIFEX。这个集成化软件JIFEX有良好的前后处理系统，比DDDU和JIGFEX更加便利实用，它的功能与特点如下：

(1)Windows9X/NT环境、自主版权；

(2)前处理系统：自动生成有限元网格与数据；

(3)后处理系统：有限元模型及结果的图形显示、打印与图文编辑等；

(4)结构分析功能：静力、动力、稳定、热传导、接触、弹塑性等；

(5)优化设计功能：

・结构尺寸优化设计、结构边界形状优化设计、布局优化设计、复合材料结构铺层优化等(按设计变量分类)。

・结构的重量优化设计、结构的强度和刚度优化设计、结构固有振动频率优化设计、结构振动响应优化设计、结构稳定性优化设计、结构的温度场优化以及与热应力耦合优化设计，多种目标优化设计等(按优化目标和约束条件分类)。

这个JIFEX在“奔腾”微机上具有大规模工程结构的分析与优化能力，适用于各种工业装备和机电产品的强度、刚度、稳定性、动力响应、热传导、三维多体接触、弹塑性等力学性能分析和结构性能优化设计。其应用范围覆盖了机械、车辆、土木、建筑、航空、航天、水利、电力、石化等领域。

JIFEX系统已作为软件产品转让，在一批工程结构的分析和设计中发挥了有益的作用。

三、思　考

力学为认识世界，发现和研究自然规律创造了丰功伟绩，而钱学森先生的技术科学思想则是引导力学走向改造世界，为工程技术和生产建设服务。他把技术科学强国思想带回祖国，发展祖国的科学事业。在力学界，他预见了计算机对力学的作用，孕育了计算力学的生根发芽。计算力学不仅解决了力学工作的计算困难，还在某些方面改变了过去力学工作的方式：例如：计算模型从回避计算困难转变到重视力学理论联系实际的现实性；力学实验模型从逼真而昂贵的物理模型转变到比较简单的力学机理模型，为计算模型提

供必要的参数和信息;研究对象从传统局限的领域跨入更新、更广的领域,等等。

计算力学使结构力学进入优化设计领域,两者都属于技术科学范畴。某些技术科学的发展必定要等待有了所需的数学方法和计算手段以后才能进行。计算力学与结构优化的发展就是如此。钱先生在《论技术科学》中指出,作为一个技术科学工作者,必须经常注意数学和计算方面的发展,要能灵敏地认出对技术科学有用的新数学和新算法,快速地加以利用。他还指出,实际上技术科学中的数学演算一般要比自然科学多,有时多得成了工作量的主要部分。一项好的技术科学的理论研究,它所用的数学和计算方法必定是最有效的。但是他又告诫说,不能误认为数学是技术科学研究的关键。关键是什么呢? 他说技术科学工作中最主要的一点是对所研究问题的认识。认识包括确定问题的要点在哪里,问题中哪些是主要因素和次要因素,要运用自然科学的理论来了解其机理。在把问题认识清楚以后,下一步就是建立数学模型。模型是根据认识简化问题本质的表达。再下一步就是数学分析和计算了,这一步工作出现在科学报告中的主要部分,但不是技术科学工作中的主要创造部分。它的功用在于通过它才能使我们的理论和事实相比较,考验我们的理论。钱先生的这些思想,值得我们认真思考。

我们在计算结构优化的研究中,确实体会到这个对技术科学研究方法的概括,是非常正确的,有重要的指导意义。对于工程结构优化这样的应用性很强的学科,注意力往往容易集中在分析与计算方法的工作上,而对问题本质的认识和力学概念的应用常被忽视。在一个不完善甚至不正确的力学数学模型上,繁琐的公式推导和冗长的计算不会提供有价值的科学结论。但是,一旦对问题的认识和科学概念上有了突破,方法与应用就会有重大的进展。例如,上面提到的在受弯薄板优化的研究中,认识到问题的症结是设计变量空间的局限性之后,才产生用微结构的概念扩大设计变量空间的路子,在结构优化界引起了一批连续体结构拓扑优化的研究。微结构概念的应用,出乎意料的居然可以使尺寸优化、形状优化和拓扑优化几个层次的优化,在方法上有了统一的求解途径,而且,由于像复合材料之类的确存在着微结构,这路子还可以使材料和结构的优化统一在一个框架中,结构优化的理论和应用从此有了一个新的发展前景。

展望21世纪,有竞争,就需要优化,各行各业都需要优化的理论和方法。我们在钱学森技术科学思想的影响下,只是在计算力学的工程结构优化设计方面做了一些工作,有其局限性,今后应该拓宽研究领域和工程应用的范围。

参考文献

1 钱学森. 论技术科学. 科学通报,1957(4):97~104

2 钱学森. 近代力学的内容和任务. 人民日报,1961-11-10(5)

3 钱学森. 现代力学. 力学与实践,1979(1):4~9

作者简介:钱令希　1916年7月16日出生,江苏无锡人。工程力学家。1936年毕业于上海国立中法工学院(现上海理工大学),1938年获比利时布鲁塞尔自由大学最优等工程师学位。回国后历任铁路桥梁工程师,云南大学、浙江大学教授,1952年起在大连工学院(现大连理工大学)工作,历任教授、系主任、研究所所长、院长。曾任中国力学学会理事长,中国高等教育委员会副会长。长期从事力学的教学与科学研究工作。在培养人才和推动科技进步两方面做出重要贡献。在结构力学、板壳理论、极限分析、变分原理、结构优化设计等方面有深入研究和重要成果。1955年当选为中国科学院学部委员(院士)。主张力学为工程服务,并身体力行,在桥梁、水坝、港工、造船和国防等工程中发挥了力学研究的作用。鉴于电子计算机强力推动科技进步,在我国大力倡导建立计算力学学科,并在大连理工大学培养和带领出一支优秀的计算力学队伍,在工程力学和结构优化设计方面做出显著成绩。

钱学森开创的物理力学之路

朱 如 曾

一、物理力学学科的创立

(一) 物理力学学科创立的基础与钱学森的大跨度思维方式

20 世纪三五十年代,随着火箭和喷气推进技术以及核能工程的兴起,需要提供非常条件下的宏观物性。例如,很高温度(譬如说,4 000K)下物质的热力学性质。对于这些物性,直接的实验测量是很困难的,有些是完全不可能的,怎么办? 只有靠计算! 怎么计算? 当时已建立了描述物质微观行为的量子力学和描述电磁相互作用的量子电动力学,并由此发展起量子化学方法、原子分子结构理论和量子辐射理论;建立了联系微观与宏观的平衡态系统统计理论,近平衡态输运理论,还有光谱、色谱等实验技术。所有这些,为基于一些间接测量和物质微观结构的知识进行真实宏观量计算的可行性提供了一定的基础。当时包括钱学森在内的一些科学家都是在做着这样的重要计算工作,解决着重要的工程问题。但是钱学森毕竟是站在巨人肩膀上的人,他有广博的学识,精通上面所提到的微观理论、统计理论、宏观的理论和应用力学、喷气推进以及应用数学等领域,有辩证唯物主义的世界观,还有独到的科学观、方法论和智慧的大跨度的思维方式,因此他在科学技术的发展上有准确的前瞻性,在物质及其运动的宏微观层次的巨大差异和复杂关系上,有雄才大略的驾驭力。所以他决不满足于有限问题的具体解决,而能准确地判断和预见到,这种扎根于物质的微观存在,服务于实际工程技术的计算和研究模式不仅仅是喷气推进等少数工程需要采用,而是未来相当普遍的工程中都需要并能够采用的。所以从科学技术的整个系统及发展来考虑,他断定这种计算和研究模式及其工程目的已决定了一个极有发展前途,并且影响必定深远的、新的力学分支。他把这一新学科命名为"物理力学"。为了吸引科学家和工程师们对这一新领域的注意,以推进其发展,他于 1953 年及时地发表了具有科学史意义的召唤文章"Physical Mechanics, a New field in Engineering Science",提出了"物理力学"这一新学科、新方向;回国后又于 1957 年发表了向中国学者介绍"物理力学"的文章。由此可见,物理力学学科是在工程技术的迫切需要和自然科学体系的支持下,通过钱学森运用他那智慧的大跨度思维方式而作出的创新之举。这正体现了他后来所总结的"跨度越大,创新越大"的经验。

(二)物理力学的规范——目的、内容和方法

没有规范则不成学科(这里,规范与著名科学史家 T.S.Kuhn 在其《科学革命的结构》中所提的范式(paradigm)相近),规范起纲领作用、认识作用和指导作用。钱学森在上述两篇文章中,对物理力学的目的、内容和方法作了如下的规范:

物理力学的目的是从材料的原子、分子结构的微观性质预见其宏观力学性质。研究内容是工程所感兴趣的物质的宏观力学性质,它包括宏观平衡态性质和宏观非平衡态性质两大类。在方法上,原则上用量子力学和统计物理。但由于计算能力的限制,原子、分子的性质不能单靠量子力学导出,也要利用灵活的实验数据。物理化学和物理学的已有成果,甚至工程技术的经验规律;由于面临的是实际问题,内容复杂,因素较多,因此必须深入研究问题的机理、构造,包括最重要机理在内的简化模型。物理力学是要解决具体问题的,问题的答案要真正可用,所以要运用最有效的数学工具和运算方法(包括简化和近似方法),把问题算到底,而不是停留于原则上的解决。这些规范使物理力学确实不同于统计物理、物理化学、物理学等学科。钱先生把上述规范概括为一句话:物理力学是用物理学的观点来解决力学里的问题。这一概括还为物理力学规范后来的发展留下了极大的空间。

(三)物理力学的二重性及其统一性

物理力学由于它的目的,从而内容和方法都服务于工程,是一种有自然科学基础的工程理论,故属技术科学;另一方面,它从微观本质上研究物质的宏观力学性质,所以它还自然地代表了力学革命的方向和路线——力学的细观、微观化,因此它同时也是一门基础性学科和一条宽广的力学研究道路。自然界就是这样,既复杂又简单,宏观现象是复杂而令人眼花缭乱的,然而它由简单而井井有序的微观规律所操纵,你不走细观化、微观化的基础性研究道路,就得不到好的回报,得不到为现代和将来高新工程技术服务的技术科学知识,这就是物理力学二重性的统一性。春江水暖鸭先知,钱学森物理力学的提出,预报了对技术科学依赖性极强的现代高新工程技术新时代和力学革命的来临。

(四)钱学森第一批物理力学的力作

除了撰文倡导和解释物理力学以外,早在 1951~1954 年,钱先生就发表了数篇物理力学方面的重要论文。内容涉及液体特性、高温高压气体的热力学性质、双原子气体的辐射计算和光谱吸收系数的计算。这些文章每篇都清楚地体现了物理力学的规范和风格以及钱学森解决困难问题的灵活高超的技巧,并在当时的喷气推进等工程中起到了技术科学应有的作用,堪称物理力学论文的楷模。钱学森的这些论文与当时国际上其他科学家的同类论文一起构成了以简化和近似手法为特点的第一批物理力学论文。同时,他在加州

理工学院亲自给 Daniel and Florence Guggenheim 喷气推进中心的研究生们讲授“Physical Mechanics”课程，传播他的学术思想，大力培养具有物理力学风格的技术科学专家，用的是他自己编写的讲义，此讲义就是他回国后出版的《物理力学讲义》前身。

从此，一个新的、从应用和基础两方面看都富有极大生命力的力学分支学科就以钱学森的倡导文章、学术论文和讲义为标志而拉开了发展的序幕。而创建物理力学这一举措的正确性和远见性已为下文要讲的，后来国内外的发展状况所证明。

二、物理力学之路越走越宽，影响越来越大

(一)我国物理力学队伍的建立和壮大

1955 年钱学森回国后，为了促进祖国科学技术、国防和民用工业的发展，他决心大力倡导发展包括物理力学在内的技术科学，增加科技储备。用现在的话来说，就是他当时(实际上更早些，是 1948 年)认识到科学技术是第一生产力。为此，于 1957 年，他在《科学通报》上著文《论技术科学》指出物理力学和计算技术等十项技术科学的新方向应该大力发展。为了培养技术科学人才，1958 年，在他和其他一些有远见的科学家的建议下，在北京成立了中国科学技术大学这一理工综合型大学。

为了发展物理力学，1956 年钱学森在《我国科学发展的十年远景规划》的“若干边缘学科建立”一节中，把物理力学列为边缘学科之一。1956 年和 1962 年两次自然科学规划中都列入了这门学科，并列为重点。在他和郭永怀的主张下，中国科学技术大学设置了化学物理系，郭永怀任主任，下设物理力学专业。他亲自授专业课的理论部分，并在百忙中抽空答疑，教材就是他的《物理力学讲义》，笔者就是有幸聆听他讲课的学生之一。“文化大革命”前先后培养了三届毕业生，1962 年还招收了一届研究生。他对物理力学发展前途的无限信心和对后辈的殷切期望充分地流露在他鼓励学生们的言语之中：“我们只是物理力学的第零代，你们才是真正的第一代。”在他自己领导的中国科学院力学研究所，他推进物理力学研究的构思是三大步：建立队伍→培养→接受国家任务。1956 年，他在力学所成立了一个物理力学研究小组，并亲任组长。后来逐步扩大，到 1964 年底，成立了包括高温气体、高压气体、高压固体、高温辐射和临界现象等方向的物理力学研究室。他培养的方式是通过每周一次的室内定期学术讨论会，要求大家轮流作学术报告，最后由他作评论和指导，当时许多研究课题即来源于这样的讨论会。到 1965 年，物理力学研究室已发展到 50 人的规模，建立了一个初具规模的高温激波管实验室，初步建成一支有攻坚能力的研究队伍，并承担了若干国家任务。

在全国范围内，由于他的倡导和影响以及葛庭燧、吴有训、苟清泉和孙湘等人的积极支持或参与，吉林大学、中科院物理研究所、合肥固体所、东北金属物理研究所、哈尔滨军

事工程学院及有关国防科研单位都纷纷搞起了物理力学研究。1966年,当条件成熟时成立了中国力学学会第一届物理力学专业委员会,召开了第一届全国物理力学学术讨论会。钱学森为了动员当时力量已较强大的物理学界关心和参与新兴的物理力学的发展,第一届全国物理力学学术讨论会是同原子分子物理讨论会联合召开的,名为“原子分子物理与物理力学学术讨论会”。

“文化大革命”期间虽然处境困难,但不少单位仍坚持工作,做出了成绩。改革开放以后,在谈镐生促成召开、郑哲敏主持的1978年全国力学规划会上,钱学森亲临讲话,强调力学的技术科学性质和力学的微观化道路。在最后制订的规划中,物理力学被列为要重点发展的边缘科学之一。力学所也恢复了物理力学研究室。此外,钱学森还曾根据我国和世界科技发展状况,先后对物理力学的规范作了四次发展(具体内容后面将详细论及)。在这些举措的促进下,物理力学研究工作恢复和发展得很快,到1986年便恢复成立了第二届物理力学专业委员会和每三年一次的全国物理力学学术讨论会。现在队伍已相当壮大,研究队伍和研究工作比较集中的已有中科院力学研究所高温气体动力学开放实验室和非线性力学国家重点实验室、中科院金属研究所、中科院国际材料物理中心、钢铁研究总院电子结构组及清华大学电子结构组、吉林大学原子与分子物理研究所超硬材料国家重点实验室、航天部二院二零七所、国防科技大学、四川大学原子与分子物理研究所及高温高压物理研究所、中国工程物理研究院应用物理与计算数学所、西南流体物理研究所、中国科学技术大学、中国科学院固体物理研究所、中国科学院物理研究所、北京理工大学应用物理系材料科学研究中心、中国空气动力学研究与发展中心高速所、云南大学物理系、浙江大学材料科学与工程学系等单位。各单位之间密切合作,互相交流,除国内会议外,还经常参加国际会议,不少专家在国外有一定影响。

(二)物理力学的需要、内容和方法的不断扩大与规范的四次发展

半个世纪以来,世界科学技术的发展状况使物理力学变得比它刚被提出时更为重要,内容更为充实,方法也更为有力,充分显示出钱学森建立这一学科的远见性。

1.物理力学的需要和内容的继续扩大

①出现了更多、更复杂或极端条件下的力学问题,需要用微观分析的方法阐明介质和材料的性质;②用本构关系表达材料的塑性变形与强度出现的困难,以及人们对固体材料断裂过程的宏观表现对微观差异跨尺度敏感性的认知,使力学的物理化和微观化更为迫切;③新材料如纳米材料、智能材料、微机械、纳米机械中的力学问题和材料设计目标的提出;④现代高速飞行技术、现代燃烧技术、现代高温化工或等离子体化工、强激光等等技术导致气体动力学的内态化以及化学反应流和辐射气体动力学的兴起。

2. 物理力学基本方法的新发展

①平衡态和非平衡态统计力学都有了很大发展,为物理力学分析问题提供了新概念、

新理论、新思路和得力的新工具。如格林函数理论,临界现象理论中的标度律和普适性概念和重正化群理论,非平衡过程随机理论中的广义 Master 方程,非平衡统计算符法,广义正则算符法和关于开放系统用投影算子法得到的广义郎之万方程, Prigogine 等从等价于刘维定理的 BBGKY 方程链出发,建立的关联动力学普遍理论 ,还有非平衡热力学和非平衡动力学方法方面的许多进展。对近平衡态输运系数建立了统一理论。对于系统在外参数变化下的行为,已形成了这样的一般认识:非平衡定态的线性区是稳定的,达到某一临界点则失稳。在涨落的触发下,发生非平衡相变,进入另一对称性或遍历性不同的非平衡定态、耗散结构或混沌。②量子化学方法、原子分子物理继续发展,为物质微观图像的清晰化提供了基础。③早在 1957 年就被钱学森在《论技术科学》一文中列为应该大力发展的十项技术科学新方向之一的计算机技术获得了迅速发展,出现了大容量高速电子计算机,使大规模计算成为现实,促成了分子动力学方法、蒙特卡罗方法和从头算分子动力学方法的发展,为研究介质及材料的平衡或非平衡态乃至瞬态力学性质,提供了有力的方法。④微观实验技术有了重要突破,已出现了原子力显微镜和扫描隧道显微镜等新型观测分析仪器,可实现原子分辨的观测,为原子尺度的微观力学理论分析提供了实验数据。

3.钱学森对物理力学规范的四次发展

半个世纪以来,根据上述世界科技发展状况向物理力学提出的高要求和所提供的新条件,钱学森曾先后四次调整和发展了物理力学的规范,对物理力学在我国的持续进展起到了不断推动的作用,使物理力学之路越走越宽。第一次是在 1966 年召开的第一届全国物理力学学术讨论会上。钱学森根据当时计算机能力较差,但原子分子物理无论在世界还是在我国都已有长期积累,做了《如何从原子分子物理出发搞发明创造》的重要报告,指明了当时条件下发展物理力学的最佳途径是从原子分子物理出发。这一号召还起到动员一大批原子分子物理学者转向物理力学方向,或有意识地与物理力学研究结合起来的作用。第二次是在 1978 年的全国力学规划会议上。他建议采用苟清泉提出的“细观”概念。从此细观力学的概念得到公认,并明确纳入物理力学的范畴,成为物理力学在固体问题上的当时的侧重方向。第三次是在 1985 年。当时,虽然如上所述,统计力学已取得很大进展,但是在简化和近似方法的基础上完成实际物理力学计算的能力仍很有限,特别是对于稠密系统;另一方面,随着计算机能力的迅猛增强,国际上开始兴起量子力学密度泛函理论与分子动力学相结合的从头算方法。钱学森看到这一方法会使物理力学解决实际问题的能力大为提高,研究面貌大为改观,他向苟清泉和崔季平建议把巨型电子计算机的计算能力用到固体物理力学的研究中去,从量子力学开始,严格地算,尽量不用简化和近似手法。这就明确指出固体强度问题也要走微观道路。第四次是 1993 年。他在给崔季平的信中指出,物理力学的范围应包括纳米材料的性质研究,并建议崔季平成立一个研究所,以促进物理力学的发展。

物理力学规范的四次调整和发展,每次都大大地促进了物理力学的发展,取得了丰硕的成果,这将在后文论及。

(三)物理力学的学术思想在国际上产生了深远的影响

物理力学思想的正确性使它从一开始就在国际上得到了普遍承认并产生了极大影响。其最显著的几项标志是钱学森的《物理力学讲义》在出版后不久就被译成俄文,并被广泛引用。1964年,前苏联乌克兰科学院成立了现在在国际上很有影响的“物理力学研究所”(英译名是 Karpenko Physico - mechanical Institute of The Ukraine Academy of Sciences),主要研究方向是用物理力学的有关方法研究固体材料的强度、塑性、韧性和断裂。1965年,该所还创办了《材料的物理化学力学》期刊。1986年,美国国家标准局蔡锡年博士明确认为,“分子动力学是钱学森教授在20世纪50年代初创立的物理力学的延伸”。随着国际上力学微观化总趋势的发展,2000年,俄罗斯科学院西伯利亚分院强度物理和材料科学研究所又创办了国际杂志《Physical Mesomechanics》。除去明确挂上物理力学牌子的单位以外,那些未挂牌子而实际搞物理力学研究的单位就是数不胜数的了。

近十多年来,计算机技术的突飞猛进所促成的分子动力学和蒙特卡罗法及第一原理分子动力学的发展,对物理力学来说简直是如虎添翼。可以毫不夸张地说,物理力学从微观到宏观的研究模式已成为当今材料科学和力学学科的世界潮流。具体例子将在第三节提及。

三、半个世纪以来物理力学的丰硕成果和对工程技术的巨大贡献

一切使用量子力学、原子分子物理学和统计力学来解决工程技术所提出的力学问题而取得的成果都应属于物理力学的成果和贡献。显然物理力学的成果和贡献数不胜数,最突出的应数中外核爆炸、核受控、现代航空航天技术、微机械、纳米科技等。可以毫不夸张地说,没有物理力学,这些工程将一事无成。现以我国为主,略举数例如下:

1. 高温、高压下的辐射不透明度和物态方程等问题的研究

(1)为供核爆炸、飞行器再入大气现象、强激光与材料相互作用研究的需要,已形成了系统的原子分子电子结构计算方法和辐射理论,为吸收及散射截面提供了系统的实用计算方法,归纳在赵伊君等的著作中;赵伊君等用气体物理力学方法对有关的辐射流体力学中的高温状态方程、不透明度进行了计算,圆满地完成了军工任务。

(2)对于高温高压下局域热动平衡系统的辐射不透明度问题,徐锡申等人从相对论自洽场平均原子模型出发,取得了很好的结果,并研制了程序,满足了重大国防任务的急需。

对于经历离解、电离、化学反应等各种过程和多种相变的物质,他们发展了一整套提

供全区域物态方程的规范方法，不仅给出物态方程函数形式，还给出数据库形式。40年来，根据国家项目的需求，共做出近40种材料的全区域物态方程及相应的数据库。在完成这些艰巨的工作中，他们在理论和方法上也取得了不少成果。在实验上，经福谦等人建立和发展了炸药平面透镜及二级轻气炮等物态方程新的实验技术，可以测量金属材料在约500Gpa以内的Hugoniot曲线，其冲击波速度测量的不确定度达到了国际先进水平。

(3)陈致英、周富信等人提出了一个预测炸药最高装药密度的经验方法，与国际上同类工作相比，该方法精度高，使用方便。他们还用蒙特卡罗方法研究了纯物质和混合物质的状态方程，得出在计算多元混合物的热力学性质和炸药爆震参数时，应当采用单液范德瓦尔斯混合物模型，特别是当各组元分子势参数相差较大时更是如此。

2. 高压效应、高压相变理论和应用以及二维Ising模型解法研究

(1)苟清泉从原子与分子的结构理论出发，提出了在高温高压条件下石墨转变成金刚石的结构转化理论框架，包括微观机理、触媒作用机理及其优选原则以及金刚石的黏结机理，并得到了多次重复的实验证明。他还从理论上预言LiH和LiD有一个新的相变。这些工作受到国外同行高度评价和重视。

(2)邹广田等人在高压相变与压力导致的新效应、地球及行星内部物质的高压、高压实验技术、超硬材料和多功能高压相材料方面取得了一系列成果，获教育部科技进步一等奖1项，二等奖1项，三等奖2项。

(3)朱如曾、孙祉伟等人于1990年发现二维Ising相变模型著名的Onsager解法中所用的复正交矩阵区对角化条件是错误的。他们给出了正确的条件，使该解法的基础更为坚实。

3. 离子化气体和高温气体的化学反应及其动力学研究

崔季平、竺乃宜等人研究了激波管诱导的电离及其过程，对激波引发电离的平衡与非平衡的本质了解及数据的累积起了非常积极的作用，并应用于再入体等离子体鞘套的研究，为开拓再入通讯的可行性途径取得了实际效果，获得了中国科学院与航天部的科技进步奖。利用单脉冲激波管研究含卤碳氢化合物及其他有机物焚烧的动力学，研究了含氯氟聚合物的烧蚀动力学及其气相产物的化学反应，系统地测定其速率常数，获得中国科学院科技进步二等奖。

4. 气体化学反应速率常数的微观理论

朱如曾于1982年针对反应位能面上存在低洼的普遍情况，给出基元化学反应的微观速率常数公式；在反应物服从玻尔茨曼分布的条件下，进而导得反应的宏观速率常数公式，并给出其中穿透系数的表示式。在反应位能面上低洼深度为零，且穿透系数与温度关系不大时，宏观速率常数公式退化为经典的Eyring公式。这一工作被高等学校教学参考书《化学反应动力学原理》(赵学庄等，高等教育出版社，1990年)等书刊所引用。

5. 气流介质与激光相互作用的理论和数值研究

高智、严海星、朱如曾等人对气流介质与激光相互作用的体系提出了气流介质用连续介质描写、激活分子用分子运动论方程描写、辐射场用经典描写并采用光强叠加原则，突破了传统的速率方程框框，适用范围更宽广，得到了明显改进了的宏观输出结果，并解释了过去不能解释的反常烧孔效应，获中国科学院自然科学二等奖。

6. 液体结构的分子动力学研究

对于简单液体的局部结构，Nelson 等人于 1984 年提出的键球谐函数法，由于含有键序参数，对局部结构的描述具有了完备性，是一种很有前途的方法。但在分子动力学模拟中对体系键序参数与标准构型键序参数相比较时，难以得到定量的结果。程兆年等在分子动力学模拟中提出了等近邻键序参数方法，克服了这一困难。

7. 量子蒙特卡罗方法研究

孙祉伟 1983 ~ 1993 年在美国 UC Berkeley（加州大学伯克利分校）及罗伦兹国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory)工作期间，从事量子蒙特卡罗研究，在电子相关函数的形式、波函数最优化、电子随机行走特性研究方法、Motropolis 随机行走效率的提高、能量导数计算方法等方面取得多项重要成果，发表有关文章 20 余篇，被 SCI 收录杂志引用的次数超过 120 次。加州大学伯克利分校的 Lester 教授在他最近撰写的文章《Research Developments and Progress During the Nineties》中，较为详细地介绍了孙祉伟在量子蒙特卡罗研究方面的贡献。

8. TFD(Thomas - Fermi - Dirac)理论的改进及其对材料研究的应用

程开甲等人根据电子密度函数连续条件和能带理论对 TFD(Thomas - Fermi - Dirac)近似提出了新的边界条件。据此建立了系统的电子理论分析计算方法。这一电子理论已用于材料性能研究的实际问题中：①给出了与实测相符的金属及多元合金的状态方程；②证明了复合薄膜材料间界面上存在巨大的内应力，微米级厚度内的应力值可达 GPa 量级，与实测结果相符，据此分析计算，提出了改善半导体材料表面张力的有效途径；③对纳米级材料的特性开展了研究，给出位错可以存在的极限尺寸，提出共晶结构的机制。

9. 晶界弛豫研究

葛庭燧等人于 1980 年代以来，揭示了晶界弛豫具有一个临界温度，从而提出了一个适合于各种温度的综合的晶界模型。发现了竹节晶界内耗峰，并阐明其机理，从而揭示了晶界附近的位错亚结构能够影响晶界本身的性质和结构，这对于多晶金属力学性质的研究提供了一个广阔的途径。他还发现晶界与邻域位错的非线性交互作用，为奠定非线性滞弹性这门新学科提供了实验基础。

10. 固体力学性质的第一原理分子动力学研究

(1)美国加州理工大学材料模拟中心W. A. Goddard等人，对于材料的力学性质计算，提

出了一套从第一原理(即量子力学密度泛函理论)出发连续计算的多尺度方案,并已用于研究金属、氧化物、陶瓷和多聚物的力学性质、相图、位错芯结构、能量和运动,以及金属和合金中的缺陷机制等。此外,他们已进入原子设计和纳米机器和纳米装配的模拟。

(2)英国剑桥大学凯文迪什实验室R.Q.Hool和皇家学院的M.Nekovee等人提出了可用于真实材料模拟的,密度泛函理论与量子蒙特卡罗方法相结合的第一原理分子动力学方法,其中,采用以密度泛函理论为主干,但用量子蒙特卡罗方法精确计算“交换关联穴”的形状,以消除密度泛函理论中半唯象的交换关联能项所带来的误差,计算结果的精度将没有限制(当然 Born - Oppenheimer 近似以及原子核运动的牛顿近似带来的误差还是存在的)。他们正在对用局部密度近似第一原理分子动力学方法已经得到的硅的自由能和熔点,重新用这一方法提高精确度,并预期这将会对地心情况的研究有用处。

(3)李微雪和王自强在局部密度近似密度泛函理论中采用赝势平面波基,对金属铝和双原子组分材料 β - SiC 在各种加载方式下的力学行为进行了系统分析。

11. 电子结构与跨尺度物性耦合研究

王崇愚等人从 1980 年代初期以来,基于密度泛函理论及第一原理离散变分方法以及多重散射波 $X\alpha$ 方法和格林函数递推方法并结合分子动力学方法和有限元方法以及位错理论,较广泛地研究了金属缺陷复合体电子结构及掺杂效应,给出了键合特性(原子间相互作用能)及缺陷体系的能量表述,建立了相关的计算模式,探索或揭示了电子结构与物性耦合机制,为材料组分设计提供了一定的理论研究基础。

12. 固体破坏问题研究

固体破坏是力学中典型的复杂现象之一,曾被钱学森归入物理力学中“连基本概念也还不十分清楚的问题”。由于这类问题的异常复杂性,不能期望问题能在物理力学的标准上一蹴而就地解决,因此从不同角度进行探讨(甚至一些十分简单的模型)而取得一些见解和启示,是十分必要的。

(1)固体破坏的共性特征研究。白以龙、夏蒙棼等人近十年来将力学、统计物理学及非线性科学结合起来,研究固体的损伤和破坏问题。指出其复杂性主要起源于多尺度非均匀性与动力学非线性的耦合效应。特别是,探讨和揭示了固体破坏的一些共性特征。这方面的进展大体可分为以下两个方面:

发展了统计细观损伤力学。基于微损伤成核、扩展和连接的细观机制和统计物理学原理,导出了微损伤的统计演化方程,并给出了微损伤数密度随时间演化的基本解。在此基础上,导出了宏观损伤场的演化方程,从而构成了应力、变形和损伤相耦合的场方程组。由上述统计演化方程还自然地引出了一个联系细观和宏观损伤的无量纲数。

基于耦合斑图动力学演化模型,提出了非均匀脆性介质损伤破坏的演化诱致灾变的概念,即整体稳定的损伤积累会导致灾变性破坏。发现了演化诱致灾变的样本个性行为

的显著差异性。样本个性行为显著差异性的机理是一种跨尺敏感性，是细观无序性效应在非线性演化过程中被强烈放大的结果。但是演化诱致灾变也显示某些共性特征，如：临界敏感性和跨尺度涨落。接近灾变点时，系统的敏感性显著提高，在演化诱致灾变过程中出现从细观到宏观的强烈涨落。

这些结果在材料破坏及地震预测领域已引起学术界和工程界的重视。

（2）固体断裂过程的协同论观点研究。近20年来，俄罗斯科学院西伯利亚分院强度物理和材料科学研究所V.V.Panin等人根据已有的实验结果和理论分析，主张把位错运动与应力引起的细观和宏观尺度的缺陷都予以处理。对固体材料的断裂过程，采用"物理细观力学"的方法和协同论的观点考虑应力集中区的剪切失稳，后者在不同尺度上的发展使得损伤逐渐积累以致失效。得到了如下一般性的原则和框架：荷载下的固体是一个自组织多尺度高度非平衡的系统；剪切流作为微观、细观和宏观尺度剪切失稳的协同演化而发展；对三种尺度上的缺陷的类型、性质、产生原因、运动特点、相互关系以及所涉及的细观耗散亚结构、标度不变性等给出了原则描述。对具体材料和荷载条件，这样得到的数据输入计算机，可用于材料力学性质的表征和计算机辅助设计。

（3）固体断裂非平衡统计理论研究。邢修三等人自20世纪60年代以来尝试用非平衡统计方法研究固体材料的断裂问题，提出了一个微裂纹相互独立的简化的理想模型，其中微裂纹的成核和长大速率由位错模型决定，并受到马尔科夫性质随机力的作用，从而微裂纹长度概率分布的演化遵从福克—普朗克方程。据此给出微裂纹分布函数随时间的变化，进而应用最弱链条件，得到材料的断裂几率、可靠性和各种宏观力学量的统计分布函数、统计平均值和统计涨落表示式。此工作1997年获得国家自然科学三等奖。

（4）材料断口分形研究。龙期威等人将分形理论和材料组织结构以及线弹性断裂力学相结合，于1985年推导出，并在1988年实验证实了断裂韧性是断口分维的指数函数，这是国际上继Manddbrot等1984年在《Nature》上发表的经验定性关系之后这方面最早的工作。论文引起国际上广泛重视和讨论，并获中国科学院1993年自然科学二等奖。1993年结合材料多层结构特点提出多度域分形新概念，从实验和理论上否定了国际上提出的断口在微米度域范围的分维是普适值的说法，后来美国国家研究委员会报告(1999)也不同意普适值的看法。共发表论文140多篇，被引用315次以上(扣除自引)。他的指数关系和多度域分形处于国际领先地位。这些工作是他2000年获得何梁何利科技进步奖的主要内容之一。

13. 固体界面物理力学研究

周富信等人应用分子动力学方法，在国际上首先使用Cu多体相互作用势，并在此基础上首先构造了Cu-Bi和Bi-Bi多体相互作用势，用来研究铋在铜晶界中的偏聚。结果模与实验相符，从而从原子层次上解释了晶界断裂的原因。

吴希俊等人1989年在国内首先研制成功大尺寸定向金属铜双晶和三晶。首先实验研究了铜双晶和三晶的形变与断裂强度与晶界结构的关系,并且与周富信合作用分子动力学从理论上模拟了铜双晶的形变与断裂的原子过程。此项研究应邀在两次国际会议上作邀请报告。1990年又在国内首先研制成功采用惰性气体凝聚——真空原位固结技术制备三维纳米块体材料的装置,研制成功屈服强度比普通多晶粗晶金属银高六倍的纳米金属银,以及其他多种高强高韧清洁界面金属、离子导体和陶瓷纳米块体材料,并提出纳米金属的范性形变和屈服过程不仅与晶粒尺寸有关,而且与晶界结构以及晶界原子迁移有关的新观点。这些研究结果获得省部级科技进步二等奖和三等奖各一项,发表论文六十余篇,被引用七十余次。

透过上述诸例,并联想两弹一星的雄伟气势,可以看到物理力学无与伦比的辉煌景象。此时此刻当我们重新捧读钱学森1957年发表的《论技术科学》或《物理力学介绍》时,怎能不产生"已是山花烂漫时,她在丛中笑"的感觉呢?

四、展　望

(一)物理力学的手段将继续不断地增强

①非平衡态统计力学一定会进一步发展出较为系统的理论,解决过去不能解决的问题。凝聚态物理也会不断有新的进展。这样,物理力学就会有更为有力的概念、思路和方法来分析它所要解决的具体问题。②随着计算机芯片的快速更新和量子电脑的问世,第一原理分子动力学方法的不断改进,计算速度、精度和可计算的原子数将大幅度快速提高。③观察仪器和实验手段将会随着计算机技术和电子技术的发展而有不断的进步。

(二)物理力学的对象和可处理的难度将会大大扩大,对未来工程技术的贡献将会更大

随着物理力学的手段大大加强和世界科技总体发展的需要,物理力学的对象和可处理的难度将会大大扩大。复杂分子构成的液体和固体、纳米材料、智能材料、微型机械有关材料、纳米机械、生物组织等对象的平衡和非平衡性质研究将会广泛深入地开展并为材料设计做出巨大贡献。现在尚无法解决,或解决得不彻底的一些困难问题,如真实物质(包括三维、低维和分维系统)的平衡相变问题、摩擦问题、高度非平衡现象问题(如有快速化学反应的气体动力学问题,真实物质远离平衡的不可逆生长过程,如金属的电解沉积,烟灰、胶体及肿瘤等实际生长过程,凝聚态物质中激波的结构,固体材料的塑性变形和断裂问题等等)都将会不断地有突破性进展。所有这些,都对未来的高新工程技术有明显的支撑作用。所以,物理力学对未来工程技术的作用将会更大。

(三)我们的责任——发扬钱学森的创新精神,主动地促进物理力学的发展

今天,一方面我国物理力学已取得可观的成绩,可以为工程技术提供进一步的支撑,做出进一步的贡献;另一方面,我国技术科学储备薄弱的局面尚未根本扭转,因此钱学森发展物理力学等技术科学、增加科技储备的思想并未过时,我们仍需要有逐步发展的恒心,学习和发扬钱学森远见卓识的开拓精神,敢于在科研安排上,果断地、坚定地对物理力学这一方向投入继续创新的人力、物力和财力,为我国当代和未来高新技术的持续发展,以及力学学科的革命性进展从战略上提供保证。然后,在战术上要仔细地、科学地进行子课题方案的充分论证,开展踏踏实实的研究,并在实际科研工作中培养和造就钱学森所殷切期待的物理力学的下一代。在自然科学和技术科学体系中,作为学科,只有物理力学是中国人提出来而得到国际承认,并已呈现了一派欣欣向荣的发展景象。对于这样一门至关民族兴衰的重要学科,我们这一代中国人肩负着因势利导、继往开来、促进发展的历史责任。

参考文献

1 Tsien H S. Physical mechanics, a new field in engineering scienc. J Amer Rocket Soc, 1953 23:17 ~ 24
2 钱学森. 近代物理介绍· 物理力学介绍.北京:科学出版社,1957
3 钱学敏. 试论钱学森的科学观与方法论. 中国科学报,1996
4 Kuhn T S. The Structure of Scientific Revolution. Chicago: Chicago Press,1960
5 Tsien H S. The properties of pure liquids. J Amer Rocket Soc, 1953,23:14 ~ 16
6 Tsien H S. Lennard – Jones and Devonshire Theory for dense gas. Jet Propulsion, 1955,25, Part, Issue9: 471 ~ 478
7 钱学森手稿. 太原:山西教育出版社,2000
8 钱学森.物理力学讲义.北京:科学出版社,1962
9 Tsien H S. Engineering and Engineering Sciences. J of Chinese Institute of Engineers, 1948,6:1 ~ 14
10 钱学森. 论技术科学. 科学通报,1957(4):97 ~ 104
11 Abrikosov AA et al. Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics. New York:Dover Pub com,1975
12 Balescu R. Equilibrium and Nonequilibrium Statistical Mechanics. New York:Wiley,1975
13 Binder K . Monte Carlo Methods in Statistics. Berlin:Springer – Verlay,1979
14 Car R and Parrinello M. Unified approach for molecular dynamics and density – functional theory. Phys Rev Lett,1985,55:2471 ~ 2474
15 蔡锡年.分子动力学和物理力学. 力学未来 15 年国际学术讨论会论文集·第一卷.北京:科学出版社,1986
16 赵伊君,张志杰. 原子结构的计算. 北京:科学出版社,1987

17 苟清泉．人造金刚石合成机理研究．成都:成都科技大学出版社,1986

18 朱如曾,孙祉伟,等．复正交矩阵区对角化条件及其对相变问题的应用．力学学报,1990,22(2):171～175

19 朱如曾．化学反应速率的微观理论．中国科学,1982(11):481～492

20 Sun Zhiwei ,MM Soto, RN Barnettand,WA Lester jr. An approach for improved variational quantum Monte Carlo. J Chem Phys, 1994(101):394

21 Cheng Kaijia. Application of TFD model and Yu's theory to material design. Progress in Natural Science,1993(3):211～230

22 Goddard WA et al. First principles multiscale approaches to prediction of mechanical properties. Proceeding of ICTAM 2000 (Chicago)

23 Hood RQ et al. Quantum Monte Carlo investigation of exchange and correlation in Silicon Phys. Rev. Lett, 1997.78:3350～3353

24 Li W X and Wang T C. Ab initio investigation of the elasticity and stability of aluminium, J. Phys. Condens Matter,1998(10):9889～9904

25 Li W X and Wang T C. Elasticity, stability and ideal strength of B SiC in plane wave based ab initio calculations. Phys Rev B, 1999(59):3993

26 Wang Chongyu, Yu Tao, Duan Wenhui, Wang Ligen. A first principles interatomic potential and application to the grain boundary in Ni, Phys Lett, 1995, A197: 449～457

27 肖慎修，王崇愚，陈天朗．密度泛函理论的离散变分方法在化学和材料物理学中的应用．北京：科学出版社，1998

28 夏蒙棼,韩闻生,柯孚久,白以龙．统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变．力学进展,1995(25):1～40;145～173

29 Panin VE. Mordern problem of physical mechanics. In Mesomechanics 2000, Vol 1. Beijing: Tsinghua Univ Press. Edt GC Sih. 2000.1127～142

30 邢修三．非平衡统计断裂力学基础·物理力学专辑．力学进展,1991(21)

31 Lung CW and NH March. Mechanical Properties of Metals: Atomistc, Fractal and Continuum Approaches. Singapor :World Scientific, 1999

32 Zhou Fu Xin, Peng Bayi and Wu Xijin. Molecular dynamics study of deformation and fracture for pure and bismuth－segregation tilt copper bicrystals. J Appl Phys,1990.68(2):548

33 周富信．物理力学．20世纪中国学术大典·力学卷．北京:科学出版社,2002

作者简介:朱如曾　1941年生,江苏靖江市人。研究员、博士生导师。1964年毕业于中国科学技术大学化学物理系物理力学专业。在中国科学院力学研究所工作,长期从事激光物理、物理力学、量子化学、微观反应动力学、密度泛函理论、量子蒙特卡罗方法、力学系统运动稳定性、非完整系统分析力学研究。曾联合获中国科学院自然科学二等奖。

钱学森与物理力学

崔季平

一、物理力学的学术思想

1953年钱学森在美国火箭学会杂志上发表题为“Physical Mechanics, a New Field in Engineering Science”一文,正式提出把物理力学作为技术科学的一个组成部分和力学的一个分支的意见。在这篇文章及以后的多次论述中指出,物理力学的目的就是要以物质的原子分子结构和微观知识为出发点,用物理学关于原子分子结构的理论,建立并推导出从微观到宏观的联系,以期达到预见工程技术中所需要的工质材料力学性质,提供可依靠的定量数据。这一思想的形成背景首先是基于工程技术的需求。在当时喷气推进技术的发展中,已经遇到了在复杂条件下,工质材料的性质用传统力学中使用的经验参数解决问题的方法受到很大限制,而在核武器中则遇到的高温、高压和强辐射状态更是对传统力学的挑战。这一切都显示力学必须与物理学再次结合,从物质结构的深层次寻求新的基础加以解决,已成为技术科学向前发展的必经之路。另一方面,20世纪上半叶物理学关于物质结构理论的突破,正好提供了这种发展的机遇。把微观的基础科学知识加以发展以解决工程技术问题,这正是物理力学所要从事的内容。物理力学的目的也就设定了它的作为一门技术科学所特有的方法论。第一,从复杂的工程技术问题中提炼模型是力学学科的传统方法论,在物理力学中除工程问题的复杂性之外,还要面对原子与分子系统的复杂性。这样也就有了微观系统模型化的问题。第二,工程上要求有准确的数据,因此必须有有效的运算方法求解而不能停留在原则上的解决。第三,在有些情况下,基础科学并不能完全解决实际问题,常常需要利用某些特定实验结果及累积的经验参数和经验规律,包括微观的与宏观的,采用理论与经验相结合的方法。这也正是物理力学方法论中的另一特色。以上三点并非空论,而是钱学森自己的研究工作所具体体现了的。

钱学森的物理力学学术思想无疑是形成于他对技术科学宏图的思考,但他的开放的科学精神也是促成这一思想的因素。可以举出的是他关于《超高速空气动力学》的论文中关于稀薄气体领域的划分,在力学上就开了跨越从微观到宏观的先河。他对气体动力学基本方程的论述中明确指出:“从微观的观点看,任何流体都是由极多的分子组成,所以气体动力学问题的基本处理得通过统计力学的原理来进行”。而这种深层联系在当时却是

经常被忽视的一个事实。

二、钱学森为发展物理力学所做的实践

钱学森从技术科学大跨度思维上提倡了物理力学,同时他本人也是身体力行、不懈地为之而奋斗。1955年钱学森回国后,积极建议把在我国建立物理力学的内容列入了1956年到1966年我国科学发展的十年规划,立志要在我国白手起家建立一支物理力学研究队伍。他设定了一个大胆而扎实的计划,共分三个步骤。第一步是由大学生开始组成一个初级研究队伍;第二步是开展有指导的研究训练;第三步是溶入技术科学的大军中,成为国家队伍中的一员,解决工程技术问题。其第一步先招收大学生做研究实习员,在他指导下自学他编写的《物理力学讲义》,每周举行读书报告会,为讲义的出版及扩大队伍作准备。1958年成立中国科学技术大学时设立化学物理系,内设物理力学专业。他本人则亲临授课。从3期毕业生中吸收了共约40名学生组成了研究实习员队伍。第二步是对研究实习员开展有指导的研究工作。共分4个课题组,分别为高温气体、高压气体、高压固体与超临界物质。研究方向选题工作是由钱学森亲自制订的,其原则是:①有实用背景,为国家发展工程技术所需要的;②考虑设定水平的先进性和具有物理力学特色;③要有良好的可执行性。其中实用的观点始终是第一的,这一条是有组织的定向科学研究所不可少的,这是组织者的责任,钱学森本人正如他自己说的这个责任是他的。第二条则是保证与工程技术和基础研究能协调,使其成为有用的、受欢迎的必要条件,而不要与需求发生冲突。第三条是对路线的判断要切合实际。钱学森在选题方面为物理力学的开展奠定了基础。例如在高温气体的研究上以航天高速飞行为背景,致力于高温气体的物理与化学性质的研究,包括平衡的与非平衡的,在充分使用物理学与化学的基础理论的知识下,用计算加上部分的和局部的模拟实验方法(如激波管实验),来满足工程上的需要。这样的路线经过多年的努力累积,终于能达到苦心经营的目的,成为高温气体的一个组成部分。在指导研究工作方面钱学森有特殊的方式。先是任命课题组长,其任务是落实研究方向,布置工作。组长与组员是学术研讨的关系,你说的有道理要人家接受,而没有行政命令的权力,组长向钱学森负责汇报工作进展。在全体人员每周一次的学术讨论会上,研究人员轮流作学术报告,钱学森通过提问引导大家开展讨论。每次会议他都给出一个总结发言,批评的意见往往是很尖锐的,特别是对于突发无根据的断想,夸大其词用以吓人,以及基本概念混乱的发言是绝对不能原谅的。对组长则加倍严格。总结发言往往是对所讨论的问题提出更为清晰的剖析而能使大家受益匪浅。记得在一次讨论会上,他即席发挥提出了像临界态有长程相关的问题,用统计力学中采用的量子场论方法去处理,这很可能是一条出路,并指示开一个这方面的读书报告会来补上这方面的知识欠缺。同时,多次提出大家要关注那些会成为物理力学发展的普遍性问题,如分子间相互作用力的问题等。钱学森

对物理力学推进发展的第三步，是要物理力学走上担当国家任务的道路。一方面是靠他在学术界的影响力，把物理力学推向国内学术界。例如他亲自到物理学学术年会上去作报告，让学术界了解物理力学的学术思想与工作。另一方面则是在力所能及的范围内与工程部门建立承担委托任务的合作关系。这两方面的努力导致1966年春在他的倡议下召开了全国第一届原子分子物理与物理力学座谈会。会议聚集了全国重要的工程技术界与科研院所的专家，共同研讨从当前到未来工程技术发展的需求与挑战，以及今后共同携手合作的事宜。

最后，还应当谈一谈“文革”中这一计划受挫时他对物理力学发展的看法。事实上，“文革”中有人以“革命”的名义强令物理力学解散，而且要钱学森自己来宣布。在那次会议上钱学森动情地给他的弟子们作告别讲话，讲的是爱迪生实验室的故事。这个故事告诉我们的是有组织的研究工作在现代社会的重要性。无疑物理力学应当有组织、有引导地发展。但是，物理力学却面对的是另一现实。最终他鼓励大家不管“分散下乡”去作“乌兰牧骑”，或是“上山砍柴”，应当看作是对物理力学的考验与锻炼。“但是，总有吹集合哨的那一天，召集你们再回来。”事实上，经过这次变动，等到吹哨的那天，人已散出多半。“文革”的影响无所不在，物理力学不能例外，但教训应当汲取。

三、新时代下物理力学的思考

1978年召开全国的力学基础学科规划会议，钱学森应邀作报告，其中提到力学的微观化作为力学发展的大趋势之一。近20年的发展结果，除了本身就是搞微观到宏观的物理力学之外，微观化已经渗透到力学的许多领域。钱学森已经离开了科学院和力学所，但是，他对物理力学的关心并无减退，并且是更加关注其命运的发展。时过境迁，但物理力学应当有系统、有组织的发展的观点依然存在，正如技术科学的思想不灭一样。1979年钱学森在为物理力学研究室的恢复的私人谈话中说：有组织的科研机构内部的人员结构应该向高级发展，要层次化。对处于高层次人的要求可用“登堂入境”来形容，这样的境界不是人人能达到的，多数人经过努力只能达到“会作研究，能解决问题”。他坦诚地说：“你们也就是这样。”但是不是就不能发展了呢？当然不是。他告诫我们应当做那些“力所能及的”事，因为一切都是有条件制约的。其次，他指出时代变化对物理力学的影响，首先是计算机的快速发展，过去不能算的现在都可以算了。而材料的强度与塑性的研究过去提不到日程上，现在解决这样的问题是有希望的。这次谈话到如今过去20年了，应当说他的判断是准确的，我国的物理力学正是朝着这一方向飞跃地发展着。

参考文献

1 Tsien H S. Physical Mechanics, a New Field in Engineering Science, J. Amer. Rocket Soc. 1953, 23: 14

2 Tsien H S. The Properties of Pure Liquids, J. Amer. Rocket Soc. 1953, 23:17

3 Tsien H S. Superaerodynamics, Mechanics of Rarefied Gases, J of Aeronaut. Sci. 1946, 13, 653

4 钱学森.气体动力学诸方程.见:Emmons HW. Ed. 徐华舫译.气体动力学基本原理A编.北京:科学出版社, 1966

5 朱如曾.钱学森开创的物理力学之路.见:庞逢甘,郑哲敏主编.钱学森技术科学思想与力学.见:北京:国防工业出版社, 2001

作者简介: 崔季平　1934年1月出生于北京。1956年毕业于北京大学物理系。现在中国科学院力学研究所从事物理力学与高温气体动力学研究,任研究员、博士生导师,所学术委员会委员。现任中国力学学会物理力学专业委员会委员,激波管专业组副组长,《力学进展》常务编委,中国物理学会《化学物理学报》编委,中国科学技术大学化学物理系兼职教授。1995年获中科院科技进步二等奖。

流固耦合力学研究与应用进展

崔尔杰

一、引　言

流固耦合力学是研究变形固体在周围流场作用下的各种行为以及固体位形对流场影响二者相互作用的一门交叉科学，其研究内容涉及流体、固体、动力学、控制等多种学科领域，在航空、航天、土木、船舶、水利、石油、化工、机械、动力以及生物工程等众多方面有着广泛的应用背景。

在航空技术发展的初期阶段，1903年Langley单翼机因气动弹性引起的静力发散而导致机翼断裂坠毁，引起人们的重视，开始了对气动弹性问题的研究。1934年Theodorsen建立的非定常气动力与颤振理论，成为经典空气弹性力学发展的一个里程碑。与此同时，1933年Westergaard关于重力坝动水压力荷载问题的研究，则被认为是水工建筑方面流固耦合研究的开端。1940年美国Tacoma吊桥因风激振动而倒塌，1965年英国Ferrybridge电厂八座冷却塔群中的三座，在不太高的风速下被摧毁，引起人们极大关注与兴趣，吸引了一大批学者对此进行研究，逐步形成了风工程这一新的学科分支。船舶流固耦合问题的研究是20世纪40年代中期由Haskind等人开始的，当时还只是考虑刚性船体与流体相互作用，进入20世纪50年代以后，大量研究工作才涉及到船体的弹性变形，到1979年Bishop和Price《船舶水弹性力学》一书的出版，把水弹性力学研究推向新阶段。

充液管道和储液容器流固耦合振动问题的研究是由前苏联学者Feodosev和Moiseev等人在20世纪中叶开创的。由于大量工程实际需求的推动，在随后的年代里这方面工作一直在迅速发展。叶轮机械的流固耦合研究高潮起始于20世纪50年代，当时所遇到的轴流压气机叶片失速颤振和压气机转子的堵塞颤振，成为研制中的一个主要障碍，引发了一系列深入的研究工作。20世纪70年代中期IUTAM一次专业会议后，叶轮机械空气弹性力学作为一个新的独立学科分支正式确立。

以上种种，连同其他一些文中未能一一提及的研究工作，构成了流固耦合力学的丰富研究内容。其中，航空航天飞行器的空气弹性和其他流固耦合问题的研究，始终占据着很大比重和较为重要的地位。

空气弹性力学是现代飞行器研制中必须考虑的一个重要问题。经典空气弹性力学只

是研究作用于飞行器结构上的弹性力、惯性力及空气动力间的相互作用,以及由此引起的各种静态、动态稳定性及结构响应问题。进入超声速和高超声速飞行后,情况变得更加复杂。高温环境引起的热效应,对于空气弹性有重要影响,考虑这一因素后,出现了“空气热弹性”。此外,制导和控制系统的特性可以大大影响空气弹性,结构弹性变形与控制系统间的耦合作用也日趋严重,因此,又出现了“空气伺服弹性”(Aeroservoelasticity)这一新的学科分支。空气弹性力学研究领域逐步扩展,涵盖的内容不断扩大,日益丰富。

本文以下的讨论将主要集中于有关航天飞行器方面的问题。

二、历史的回顾

在我国航天事业发展的初期阶段,钱学森院士就高瞻远瞩地提出要建立一支专业技术队伍,开展航天飞行器空气弹性和其他流固耦合问题的研究。1960 年由当时航天系统的结构强度与环境研究所和北京空气动力研究所,集中了一批科技人员,成立联合课题组,开始进行这方面的研究。以后,各型号设计部门也相应组织起自己的队伍,密切结合型号研制需要,进行空气弹性分析与设计工作。40 年来,在型号需求和专业发展的双重推动下,研究工作取得很大进展,解决了大量各类实际问题,为型号研制做出了应有的贡献。现将研究中涉及的主要问题及取得的结果做一概要的回顾。

(一)翼面颤振

导弹类外型大都采用小展弦比薄翼和钣式整体结构,飞行速度和动压范围与一般飞机有所不同,其颤振特性也具有自己的特点。为此,发展和建立了多种小展弦比翼面非常气动力计算方法和程序,进行了大量结构动态特性和颤振分析计算,并在低速和跨、超声速风洞中进行了动力相似和简化缩尺模型试验。研究结构表明:①颤振临界状态可能不在跨声速区而出现在较低的超声速 M 数;②与一般低速颤振不同,存在一种振幅激剧增大而破坏的突发性颤振模式;③对于很薄的整体翼,大变形的非线性效应可引起极限环振荡。

(二)操纵面颤振与防止措施

对带有操纵面的机翼和全动式舵面进行了大量理论计算和风洞试验,并深入研究了防止操纵面发散、反效和颤振的各种可能措施。研究结果表明:带有操纵面的机翼颤振特性出现复杂变化,颤振主要形式除主翼面弯 - 扭耦合外,还会出现主翼弯扭和操纵面偏转等多自由度耦合情况,也可能出现单自由度嗡鸣。过去飞机上广泛采用的质量配平防颤振措施,对于薄翼面并非最好途径,提高操纵系统刚度,对防止发散、反效和颤振是普遍有效的,将气动中心移到转轴之后可有效防止发散,采用活动间隙和刚度都满足一定要求的所谓“不可逆”操纵面,从空气弹性角度看是非常有利的。

(三) 细长弹体动力发散与颤振

按刚性设计的静稳定弹体,由于气动弹性影响,在飞行中可能变为不稳定的,为此,建立了沿细长弹体有多个集中升力载荷的导弹外形的动力发散与颤振计算方法,并进行了型号设计计算。对带有翼面和舵面的复杂飞行器外形,各部件之间存在严重的气动干扰,对此提出一种能考虑气动干扰的空气弹性分析方法,后来又对此方法做了发展,在结构分析方面引入分支模态法,可同时考虑全弹刚体运动和弹身、弹翼、尾翼弹性振动等多种自由度结合,合理考虑了部件干扰和下洗影响并提出了一种适合于多自由度颤振临界参数计算的限制增量渐近搜索法,成功地预测了多种型号的全弹颤振。

(四)大型运载火箭跨声速抖振

对于机翼抖振问题,在航空气动力界已有广泛深入的研究,但对于具有锥/柱外形的细长火箭弹体,跨声速飞行时,由于气流在锥/柱结合部形成附体与分离交替变化的流态,在靠近头锥部的柱段区会出现前后振荡的激波,造成很强的局部脉动压力,导致火箭弹体抖振的发生。为了解决这一问题开展了跨声速风洞试验和相应的理论分析工作,获得了不同参数条件下的流态分类特征,抖振脉动压力及其功率谱密度数据,发展了气动阻尼数值计算和试验测量方法,建立了抖振响应的分析预估程序并探讨了减弱和抑制抖振响应的措施,解决了型号研制中的一项关键技术问题。

(五)地面风载和风激振动

大型运载火箭在地面竖直发射时,可能经受强风作用,引起很大的结构风载荷,激起结构振动,产生附加的根部弯矩,成为火箭结构设计中必须考虑的载荷条件之一。火箭在主动段飞行时可能遭遇到高空风,包括随机阵风和风剪切,形成附加风载荷,引起姿态角变化和弹道偏离。为了解决这一问题,进行了理论分析和风洞模型试验研究,获得广泛 Re 数范围内,风引起的弹体气动载荷、火箭风激振动特性,特别着重研究了Re 数影响、头部三元效应和不同风速、风向下邻近物体(如发射架)和结构参数变化和影响,研究并提出了抑制和减小风激振动响应的有效方法。

(六)弹性变形与控制系统耦合导致的不稳定

在型号研制的初期阶段就遇到过此类问题。一个按照刚性结构设计是稳定的飞行器, 在实际飞行中,由于弹性变形的影响,可能变为不稳定。有两种可能的形式,即:结构发散、颤振等动力不稳定或者飞行失稳、失控。

由于一般控制系统的反馈环节是姿态角、舵面或其他控制装置的偏角传感器,在它们安装位置的弹性变形将给出虚假信号。此外,结构振动变形所产生的附加非定常气动力,尤其是气动刚度和气动阻尼项,将对控制系统稳定性产生很大的影响。

通过对弹体结构动力学分析,计算出起主导作用的振动模态和频率,据此合理选择传感器位置,以及在控制回路中附加适当的阻尼镇定环节和调整系统的各种动力学参数,可使此类问题获得满意的解决。在此过程中,已知系统特性和外部激励,预示系统响应的理论建模正方法和以系统响应信号实测和分析为基础,对系统参数进行识别和改进完善的反方法,成为相辅相成的有效手段。

(七)动力装置的低频振动

这是动力装置结构与流体相互作用产生的振动现象,包括结构整体与管泵系统液体脉动压力耦合振动和局部结构与液体脉动压力相互作用引起的振动两种情况,其频率一般在10~20Hz之间。它们的出现不但加重了动力装置的低频振动环境而且可传至陀螺平台或减振器系统,成为增大原已存在的液路系统主振动的重要原因之一。

通过理论分析、地面试验和多次飞行试验,采取了多项相应的工程措施,有效地抑制了这种危害性极大的低频振动。

(八)充液管路和充液弹性储箱的动特性

这一问题对大型液体火箭具有十分重要的意义。对输液管道,一般简化为梁或壳体模型并考虑其支撑弹性影响。在充液储箱中的液体晃动与储箱的几何形状、内部结构、充液量和安装布局等因素有关。分析中,经常采用两种方法,一种是将液体作为固化的分布或集中质量;另一种则是将储箱和液体分别看成两个独立的系统,进行流固方程的耦合求解。对于带有充液储箱飞行器的飞行稳定性问题也进行过分析和计算,给出与实际情况相符的结果。

(九)POGO振动分析和预防

POGO是大型液体火箭的结构纵向振动与推进系统相互作用而产生的一种不稳定自激振动,虽然其发生概率并不大,但对于火箭的飞行安全具有极大的危害。通过对全箭纵向振动特性(模态、频率、阻压等)以及推进剂输送管路系统和发动机动态特性的试验和理论计算,防POGO蓄压器的设计研制、以及其变频降幅效果的理论分析与试验测定,稳定性判定及参数不确定性影响的分析,成功地解决了这一问题,并通过与飞行遥测参数的分析比较,对方法进行了考验。

此外,在型号研制过程中还遇到和解决了其他一些流固耦合方面的问题,如仪器舱的外压失稳,空气动力噪声和声激振动等等,这里不拟再做详细讨论。

三、研究与应用进展

随着现代高机动性飞行器的发展、先进结构和功能材料的大量使用,控制系统精细化

和高效化以及计算机技术的突飞猛进,向流固耦合力学提出了许多挑战性课题,也为其提供了进一步发展的广泛可能性。以下将就流固耦合力学当前和今后发展中的几个重要前沿研究领域及其应用方面的问题做进一步讨论。

(一)流固耦合非线性问题研究

基于线性化结构和流体动力模型建立的一整套流固耦合问题的分析处理方法,过去,在解决实际工程问题中发挥了重要作用,今后仍将有其广泛的应用场所。但是,现代飞行器对大迎角高机动飞行,甚至具有过失速机动能力的要求,气流分离、旋涡干扰等现象的出现使气动力进入严重的非定常和非线性状态,材料性能、利用效率和结构设计水平的提高,飞行器外形和操纵面的多样化和复杂化,以及操控系统设计的日益完善,带来了大量的结构非线性因素。因此,各种非线性流固耦合振动现象大量出现,如幅值跳跃、参数不稳定、内部共振、极限环和饱和现象等等。非线性问题不仅会使产生动不稳定的临界速度变得比线性理论预示的结果更低,而且常常会引起运动形态的改变,如极限环和混沌状态的存在,成为导致结构疲劳破坏的重要原因,因此对非线性问题的研究不但具有理论意义而且对工程问题也有现实的重要性。

迄今为止,在各类飞行器上已经遇到的非线性空气弹性不稳定现象是多种多样的,包括:跨声速机翼的非线性颤振,激波振荡和流动分离诱导的抖振,动态失速以及翼前缘分离和体涡引起的尾翼抖振,直升机旋翼非线性动不稳定,机翼大变形影响,非线性弯扭效应,干摩擦,旋转间隙,非线性结构阻尼作用下的颤振等。对这类问题的研究形成了近年来空气弹性问题研究的热点。

20世纪90年代初期,Dowell在《非线性空气弹性》一文中,以纵向压缩变形和横向位移间存在非线性关系的薄钣颤振、跨声速翼型颤振和钝物体旋涡脱落诱发横向振动等三个具有代表性的例子,详细讨论了气动力和结构非线性引起的流固耦合振动的典型特性,分析了三种不同的描述方法:即完全线性模型、动力线性模型(静态特性采用非线性描述而动力特性做线性化处理)和完全非线性模型,在解决流固耦合问题时的适应范围,具体给出了出现极限环振动和进入混沌状态的参数条件,并且指出:在非线性条件下,流固耦合振动系统,可能出现多个动力平衡状态,它们对系统参数和初始条件有紧密的依赖关系。

文献18以直升机旋翼叶片作为对象,研究了作挥舞和俯仰运动时的非线性颤振不稳定性和失速响应问题,考虑了仅结构是非线性的,仅气动力是非线性的和结构与气动均为非线性的三种不同情况。得到的主要结论是:结构和气动力非线性作用常导致极限环颤振、其幅值依赖于自由流速度、初始俯仰角和其他运动参数,而运动形态(周期、准周期或混沌)对初始扰动非常敏感,因此在研究该类问题时要非常小心地处理初始条件。在运动接近颤振边界时或者进入失速状态后,都会出现“混沌”运动,在下极限颤振点附近,混沌

运动特性主要由结构非线性因素所主导；在上极限颤振点附近，气动力非线性将起主导作用。当满足混沌运动的条件后，不管是挥舞运动还是俯仰运动都可能进入混沌状态，但俯仰运动将占主导地位。文献19对于一个具有非线性结构特性，可以做俯仰和浮沉二自由度运动的机翼模型做了理论和试验研究，结果表明，对于这样的非线性系统，可能发生阻尼衰减响应、间隙性混沌、极限环和颤振等四种运动形态。在较低的速度下，系统处于衰减振动状态，当速度增至某一临界速度后，系统将进入不衰减的自持状态，所对应的幅值有界的振动可能是极限环的或者混沌的。极限环是由有限个频率和幅值的周期性振动组成，混沌运动是非周期的，它包括许多不同频率和周期，随着速度的进一步增加，达到另一临界速度后，系统振动将变为发散的。

近年来，复合材料机翼和带有主动控制系统机翼的非线性空气弹性不稳定研究成为人们关注的问题，使非线性空气弹性研究领域日益扩大和深化。非线性空气弹性问题的研究虽然已经取得很大进展，但尚待进一步解决的问题还很多，例如：非线性动力学和空气动力简化模型表示方法的完善；动力学分析和动稳定预示方法的改进；非线性流固耦合问题的直接数值模拟，非线性流固耦合参数影响的分析、结合工程应用需求对抑制非线性不稳性方法的探索等等。

（二）复合材料结构的空气弹性剪裁和优化设计

充分利用材料的高性能，最大限度减轻结构重量，始终是飞行器设计中追求的重要目标。复合材料以其重量轻、比强度和比刚度高以及机械性能的可设计性与可剪裁性而在众多工程领域，特别是航空航天领域中得到日益广泛的应用，并由此引发了结构设计概念的重大变化。复合材料结构的动力学和空气弹性特性以及优化设计也自然地成为人们关心和研究的重点之一。美国早在20世纪70年代初期就开始了这方面的研究，包括理论和试验两个方面，并提出了“空气弹性剪裁”(Aeroelastic Tailoring)的概念。

复合材料一般是由基体材料与增强纤维复合而成的，叠层板就是其中最常见和应用广泛的一种。所谓空气弹性剪裁就是通过合理选择基体材料、纤维排布方向和厚度以及铺层顺序等，使之满足预期的性能要求，达到减轻结构重量，增加承载能力并最终使飞行器性能得到改善的目的。从空气弹性角度来看，复合材料还有一个显著特点，那就是它的方向性。人们可以通过特殊的设计，使结构在弯曲和扭转方向具有不同的刚度，控制不同方向的变形和调整其间的固有振动频率比，可以对其空气弹性特性进行控制，使颤振等不稳定运动状态在飞行参数包络范围内得到抑制。此外，通过控制结构弯、扭方向的变形，还可以有效改变翼面气动载荷分布，改善操纵面的效率，以及有效改变翼面气动力压心在纵向和横侧的位置分布，改进飞行稳定性。利用复合材料特性的优化设计或者说利用其各向异性特性，按照某种要求进行剪裁，可得到满足各种限制条件(如强度、发散和颤振临

界速度等)的最小重量设计,也可以保证在气动升阻比、操纵效率、载荷分布等方面得到最有利的弯扭或挠曲变形状态。

一个完整的空气弹性优化过程包括:结构分析、气动矩阵的建立、优化控制律的设计、空气弹性不稳定分析、系统优化算法和参数敏感性分析等全过程,对于外形较为复杂,影响参数较多的实际复合材料结构,其中每一个步骤都涉及许多复杂而困难的技术问题。目前公开发表的文章大都是针对矩形均匀平板梁式翼面或其他理想化模型进行的。在优化算法方面有很大发展,先后提出了多种多样的具体方法,如叠层板参数图法、整体规划算法、递推平方算法、近似微商牛顿方法、多级优化算法、遗传算法等等。美国还为此发展了一些优化计算程序,如 TSO,I-DESIGN 和 NEWSUMT 等。这里不可能做详细讨论,有兴趣者可参考有关文献。

在这方面今后还有许多工作有待进行,例如:对我国实际应用的复合材料特性,包括材料的等效模量(刚度)、拉压强度、层间应力、材料界面性状影响以及动态特性等进行分析,以建立更符合实际的结构动力学模型,深入研究结构性能及变形形态与复合材料特性和结构参数的定量化关系,建立满足空气弹性要求的材料和结构的有效设计手段,发展优化设计算法,建立自己的优化算法程序并进行验证等等。

(三)空气伺服弹性和颤振主动抑制

空气伺服弹性是一个涉及飞行器柔性结构、非定常气动力和飞行控制系统相互作用的交义研究领域。对于带有控制系统的飞行器来说,飞行过程中弹性力、惯性力与控制力相互作用,可能导致结构振动或飞行状态的不稳定。美国 YF-16、F-18 飞机和其他型号发展的早期阶段就曾遇到这类问题。在 YF-16 的飞行中出现了一种频率较低的反对称不稳定振荡,后来降低控制系统增益,并修改了一个通道的反馈回路,按照刚性飞机假设所进行的分析计算表明,修改后的飞机是稳定的,好像问题已得到解决。但再次试飞中却发现,始终存在着一个定态振荡。随后,对该不稳定状态,做了考虑结构柔性的飞机动力学和飞行控制系统的耦合分析,发现其间的耦合可导致飞机失稳。

有关飞机空气伺服弹性问题国外已有较多研究,但直到今天这方面的工作仍在继续进行。20 世纪 90 年代,美国 NASA 的 Langley 研究中心开始执行几项研究计划,包括:①提高预示空气伺服弹性相互作用的模拟和分析能力;②改进结构/控制一体化设计能力和对低阶鲁棒性数字控制律的研究;③主动柔性机翼(AFW)计划;④现有空气伺服弹性分析和设计技术应用于高超声速飞行器问题的评估等等。其中主动柔性机翼计划是空气伺服弹性力学对于柔性机翼的具体应用,在 1996 年开始的该计划的第二阶段中,AFW 改称为 AAW(Active Aeroelastic Wing)。第四个项目,在考虑到高超声速飞行中的严重气动加热效应后,被扩展为空气伺服热弹性 ASTE(Aeroservothermoelasticity)。

主动颤振抑制(Active Flutter Suppression)是利用主动控制技术抑制或消除颤振等不稳定运动的一种方法,与早期普遍采用的被动控制方法,如增加结构刚度、改善质量平衡等相比,其主要优点是无需(或者很少)对结构做出改动,而是依靠对系统施加主动控制力来减弱甚至消除空气弹性不利的耦合效应,达到抑制颤振的目的。当然,主动控制技术的作用不仅限于此,它可以在更广的范围内用于飞机的阵风减缓,乘坐品质改善、放宽静稳定设计等方面。主动控制技术的发展从20世纪70年代开始,至今已有较长的历史,并且已进入工程实用化阶段,它的广泛应用大大推动了空气伺服弹性这一学科分支的发展。国内这方面研究起步较早,已取得很好的成果。

空气伺服弹性研究经常面对的是两大类问题,即:对于已给定的控制系统,研究和确定系统特性及受控响应,称之为系统的分析问题;另一类是在已知系统特性和控制要求的条件下,设计能满足要求的控制系统和相应的控制律,称之为系统综合问题。经典控制理论和现代控制理论的许多方法都可直接应用于该问题的研究。现代控制理论由于能更方便地考虑多输入、多输出系统,在具体应用中显示出明显的优越性。

研究气动伺服弹性和颤振主动抑制首先要考虑的问题是,如何建立合理的ASE系统模型。应用现代控制理论,则要求在时域里建立状态空间模型,因此如何将结构、气动和控制系统各个环节转化为状态空间表述形式成为关键问题。

一般非定常气动力是以简谐振动形式在频率域中给出的,因此要将其转化为Laplace复频域内的函数表达式。早期Jones提出了对若干频率点值进行拟合并解析延拓到整个复平面上的想法,以后Roger,Karpel等人又发展了多种非定常气动力的有理函数近似式,但这些方法在计算精度、系统阶次增加以及非线性计算量和复杂性方面还分别存在着一些不足,仍有待研究改进。

在ASE系统模型的建立方面,经典颤振分析中经常采用的结构影响系数法、模态迭加法,甚至以有限元分析为基础的直接数值方法都可以应用。但对于这种复杂系统,如何尽可能降低模型阶数显得特别重要,基于这一考虑,模态迭加方法几乎成为首选,结合频率并合,系统降阶和能量方法的使用,可以使最终建成的模型具有较低的阶次,为设计分析提供了很大便利。

在控制律设计和系统优化方面,由于颤振是一个动稳定性问题,因此控制理论中常用的一些设计、分析和稳定性判定方法,几乎都可以应用于颤振主动抑制问题,应用较多的有:古典控制论中的根轨迹法,现代控制论中的二次型优化方法以及基于能量意义的各种设计准则,这些方法在应用于不同类型的实际问题时各有优势与不足,这里不可能做细致讨论,有兴趣者可参考相应的文献。

空气伺服弹性和颤振主动抑制是一门结合实际工程应用正在不断发展中的学科分支,在模型降阶技术,气动力的时域表示方法,控制律设计以及系统的优化算法特别是控

制系统的鲁棒性、自适应性设计以及适应更广泛状态变化的变结构控制技术的应用方面还有很多工作可做。

(四)智能结构和可变形体的流固耦合问题

这是一个新兴的研究领域。近年来,智能材料和以智能材料与控制技术相结合而形成的可变形体或自适应结构技术有了很大发展。这种形体和结构,将微小型传感器、控制线路和作动机构,设置在材料内部,形成一个整体,可以在感受到结构的外部载荷,振动变形或其他环境参数变化后,做出分析判断,然后驱动结构变形或运动,对输入信号做出响应,并将输出结果反馈给控制系统,按照预定要求实现控制动作。

这方面较为简单的应用例子是美国近年来发展的所谓动力变形前缘技术(Dynamically Deforming Leading Edge,简称 DDLE)。已知在可压缩流情况下,动态失速是由前缘区域很强的逆压梯度或激波诱导分离引起的。通过安置在机翼前缘内部的作动器,可以驱动柔性的前缘蒙皮,产生所需变形,减少局部 M 数,改变压力分布来控制失速。这一技术也可用于尾翼、操纵面甚至机身,按照预定要求,改变局部外形或产生一定的弯曲或扭转,达到增升、减阻或产生附加的俯仰、滚转力矩。

还有一种是前面已经提到的主动气动弹性机翼(AAW)。这种机翼是柔性的,其上装有若干调整片或前后缘控制面,在气动力作用下可以产生足够的力,使机翼发生弯扭变形,从而改变飞机的纵向或横侧特性,主动地产生对飞机的滚转、偏航力矩而无需靠操纵面施加力或力矩。随着微机电系统(MEMS)的发展,人们可以在机翼或操纵面上布置大量的微作动板代替常规的操纵面,这些微作动板平时贴合在机翼表面,接受到控制信号后,将产生一定的动作,微型传感器监测翼面气流参数,并通过控制系统按一定规律调整微作动板的位置,这种对气流的精确分布式控制,可以大大提高飞行器的机动性和气动效率。

上面各种技术的发展已经进入了模型试验验证阶段,这方面的进展无疑对流固耦合研究提出了新的挑战,虽然距实际应用还有相当距离,但应引起我们的注意。

参考文献

1 邢景堂, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述. 力学进展, 1997, 27(1)

2 Theodorsen T. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. NACA TR496, 1934

3 Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes. Trans. ASCE 98, 1933

4 Simu E, Scanlan R. Wind effect on structures. John Wiley & sons, 1986

5 Haskind M D, The oscillation of a ship in still water. Izv. Akad. Nauk SSSR. Otd. Tekh Nauk 1, 1946

6 Bishop R E D, Price W G. Hydroelasticity of ship Camb. Univ. Press, Cambridge, 1979

7 Feodosev R P. Vibration and stability of a pipe When liquid flows througe it, Inzhenernyi Sbornik, 10, 1951

8 Moiseev N N. Introduction to the theory of oscillation of liquid - Containing bodies. *Advance in applied Me-*

chanics, 1964, 8

9 周盛等. 叶轮机气动弹性力学引论. 北京: 国防工业出版社, 1989

10 Bisplinghoff R L, Ashley H, Halfman R L. Aeroelasticity Addison – Wesley Publ Comp Inc. 1957

11 Noll T.E doggett R V, Rickett R H, Aeroservothermoelasticity – A Review Presented at Tenth National Aero – space plane Technology Sympoium, Paper No. 104, 1991

12 Noll T E. Aeroservoelasticity AIAA – 90 – 1073CP, 1990

13 陈文俊. 小展弦比翼—操纵面系统的防颤振设计方法. 系统工程与电子技术, 1993(7)

14 杨炳渊. 全弹组合体超音速颤振的一种工程计算方法. 空气动力学报, 1983(4)

15 陈文俊. 弹体纵向气动伺服弹性发散分析. 战术导弹技术, 1995(1)

16 黄怀德. 液体火箭的纵向耦合振动. 见:振动工程手册(下册第十五章). 北京:宇航出版社, 1995

17 Dowell E H. Nonlinear Aeroelasticity AIAA paper – 90 – 1031 CP, 1990

18 Tang D M. Dowell E H. Flutter and stall response of a helicopter Blade with structure nolinearity. *J of Aircraft*, 1992, 29(5)

19 Hauenstein A J. Laurenson R M. Chaotic Response of Aerosurfaces with Structural Nonlinearities. AIAA 90 – 1034CP, 1990

20 Shirk M H, Hertz T. J. Weisshaar T, Aeroelastic Tailoring – Theory, Practice and Promise. *J of Aircraft*, 1986, 23 Jan.

21 Weisshaar T A. Aeroelastio Tailoring of Forward Swept Composite Wings. AIAA 80 – 0795R. 1981

22 Dracopoulos T N. Oz Hayrani, Integrated aeroelactic control optimization of laminated composite lifting surface. *J of Aircraft*, 1992, 29(2)

23 Visser J A P. Aeroelastic and strength optimization of a composite aircraft wing using a multilevel Approach AIAA – 99 – 1258, 1999

24 Peloubet R P, Haller P L, Bolding R M. Recent Developments in the F – 16 Flutter Suppression with active control Program. *J of Aircraft*, 1984, 21(9)

25 Noll t, Perry B, Gilbert M. Recent activities in aeroservoelasticity at NASA Langey Research Center. NASA TM 101582, 1989

26 ThompOson G O. Kass G J. Active flutter Suppression – An Emerging Technology. *J of Aircraft*, 1972, 9(3)

27 Jones R T. The Unsteady Lift of a wing of Finit Aspect Ratio. NACA R – 681, 1941

28 Roger K L. Airplane Mathmatic Modeling Method for Active Control Design. AGARD – CP – 228, 1997

29 Karpel M. Design for active flutter suppression and gust Alleriation Using State – Space Aeroelastic Modeling. AIAA paper 80 – 0766, 1980

30 Nissim E, Lottati I. An optimization method for the determination of the important flutter modes. *J of Aircraft*, 1981, 18(8)

31 Garrard W L, Liebst B S. Active flutter suppression using eigenspace and linear quadratic design techniques. AIAA Paper 83 – 2222, 1983

32 Nissim E. Recent advance in aerodynamic energy concept for flutter suppression and gust Alleviation using active controls. NASA TN D－8519, 1977

33 Chandrasekhara M S. Unsteady stall control using dynamically deforming airfoils. AIAA paper 97－2336. 1997

34 崔尔杰. MEMS与智能化流体力学. 空气动力学学报, 2000(18): 52～59

作者简介:崔尔杰　1935年11月出生。1959年毕业于北京航空学院空气动力学专业,现为中国航天科技集团公司第七〇一研究所研究员、科技委主任。1980～1982年曾在美国普林斯顿大学机械与宇航工程系作访问学者和客座研究员。1987年起先后担任过中国科技大学、北京航空航天大学和山东工业大学兼职教授,并担任中国空气动力学学会副理事长和亚洲流体力学会副主席,1999年当选中国科学院院士。长期从事航天飞行器动态气动力研究,突破该领域多项关键技术,为型号研制做出贡献。在非定常流与流固耦合等基础研究以及工业空气动力学应用研究方面做出创新工作,主持“全垫升气垫船”和“地效飞行器”研制项目,取得成功并获实际应用。

钱学森与力学

谈庆明

钱学森先生是国际知名的力学大师,他的许多力学著作堪称经典文献,他对近代力学以至技术科学的内涵和发展方向发表过全面系统的论述,笔者在这里谈谈自己的学习心得,作为对科学家钱学森和近代力学史研究的探讨。

一、从学习“火车头”转向研究“飞机”

1929年,钱学森中学毕业后,眼见庞大的祖国疆土关山阻隔、军阀割据、交通落后,便考入上海交通大学机械工程系,学习铁道机械工程专业。

1934年,钱学森以优异成绩从交通大学毕业。大学的学习大大拓宽了钱学森的眼界,他的兴趣逐渐转向了新一代的交通工具——飞机,同时他也认识到飞机在战争中的重要作用。国民党政府在1928年设立了航空署,1934年改称航空委员会,下面只有修理厂,不能制造飞机。1932年1月28日,日本飞机轰炸上海,中日空军多次空战,中国飞行员驾驶的却不是国产飞机。钱学森深切觉悟到,为抵御列强侵略,必须建立自己国家的航空工业。因此,他报考清华学堂公费留美,专业是飞机设计。考试的专业科目是航空工程,得到了极高的分数——87分,终于被录取。这就是后来他自己说的从学习笨重的“火车头”转向研究轻巧的“飞机”的过程。

二、在美国的力学研究

1935年秋,钱学森进入美国麻省理工学院航空工程系学习。学习成绩超群,这使他感到作为一名中国人而自豪。然而,当时美国的航空工厂不欢迎中国人去实习。经过一年时间取得硕士学位以后,他决定转学加利福尼亚理工学院(简称 Caltech),追随力学大师冯·卡门(Theodore von Karman),学习与航空工程有关的基础理论,即应用力学。

1.应用力学研究的时代背景

20世纪一开始,航空技术的发展与流体力学的研究基本上是脱节的。1903年,莱特兄弟实现了第一次有人驾驶的动力飞行,但流体力学家并没有给他们提供设计原则。

那时,不会求解有黏性的流体力学方程,而无黏性流体力学的理论却说明,物体在流体中运动既无阻力也无升力,当然与实际不符。到了1904年,德国的普朗特(L. Prandtl)

提出了边界层理论,只需在物体表面附近考虑黏性的作用,求得了物体所受到的摩擦阻力。从此,由普朗特开创的应用力学便和航空技术紧密地结合起来,成为推动航空技术发展的理论基础。

20世纪的最初30年里,西欧和俄国的力学大师们围绕飞机的升力和阻力的原理以及材料和结构强度的理论,取得了丰硕成果,为全金属飞机的设计和制造提供了可靠依据。

如果说,20世纪初是普朗特在德国的哥廷根开创了应用力学学派,那么到1930年则是他的优秀学生冯·卡门把应用力学从德国带到了美国。1929年底,冯·卡门到Caltech任教。他与航空公司保持紧密联系。他为Douglas公司解决了因提高速度而发生颤振的问题;他为了提高刚度,在金属板壳上加筋,使Douglas公司制成了第一架全金属飞机。这些成就为Caltech在新兴飞机工业中赢得重要地位,也体现了应用力学的巨大威力。

1935年,冯·卡门参加第五届Volta会议,这次会议标志着超声速时代的开始。1936年,钱学森转学到加州理工学院,开始应用力学的学习和研究。

2. 博士学位论文和卡门—钱近似方法

冯·卡门建议钱学森在博士论文的工作中,研究与高速飞行直接相关的考虑空气可压缩效应的问题。经过3年紧张和艰苦的工作,1939年,钱学森完成了极其出色的学位论文。论文内容丰富多采,共4个部分。前3个部分的工作,即可压缩流体边界层、有倾角的回转体超声速绕流以及应用恰普雷金变换求解二维亚声速流动,是冯·卡门建议做的;第4部分则是和同学马林纳合作研究的结果,内容是以逐次脉冲推进的探空火箭的飞行分析。

论文的第1部分涉及高速飞行体所受到的阻力和表面热效应。在那时的文献中,普遍认为超声速飞行的空气阻力主要来自激波阻力,而表面摩擦阻力并不重要。至于热效应,一般认为飞行体的表面被周围的空气所冷却。然而钱学森却得到了崭新的重要结论:第一,在高速飞行中,空气可压缩性对表面摩擦具有重要影响,摩擦阻力大于激波阻力;第二,当飞行马赫数增大到一定数值时,飞行体表面的空气薄层中所产生的热量不仅不能被忽略,相反地将对飞行体起加热的作用。这一新结论的重要性在于,从理论上预见了实现高速飞行将面临的一大障碍,即后人所称谓的"热障",必须采取有效的冷却或防热措施。

论文的第3部分是寻求计算高速飞机翼面上压力分布的方法。那时,对于亚声速流动,已有的方法只能计算机翼很薄或飞行速度较低的情况。1932年丹姆千科(Demtchenko)以及1933年布兹曼(Busemann)采用了查普雷金变换,把原来的非线性方程化为线性方程,用驻点处的切线代替等熵关系曲线,求得翼面上的压力分布,可惜只适用于飞行速度为马赫数小于0.5的情况。冯·卡门凭着对物理问题的洞察力,建议钱学森不用驻点处的切线而改用来流状态点处的切线代替等熵关系曲线,可能会得到更好的结果。钱学森证明,虽然同样是切线近似,采用来流状态点处的切线近似,果然得到更为精确的结果,适用范围还可扩大到高亚声速的流动。在第二次世界大战期间及战后一个相当长的时期,上述近

似计算方法广泛应用于飞机翼型的设计,这就是著名的“卡门—钱近似”方法。

上面只是对钱学森博士论文的第一和第三部分作了简介,从中可以看出,钱学森刚进入力学界便写出了对空气动力学的发展起重要作用的经典文献,展示出他的过人才华。

1939 年 6 月,钱学森获得航空与数学博士学位。在 1939~1953 的十多年里,钱学森在应用力学领域,紧密联系高速飞行,为突破“声障”和“热障”,几乎全方位地进行探索,并做出了重大贡献。

3. 薄壳稳定性

1939 年,钱学森获得博士学位后,开始对薄壳的失稳问题发生了兴趣。这是因为:①第二次世界大战已经开始,各国正在制造全金属薄壳型飞机。薄壳结构强度高而质量轻;但当载荷超过某一数值,会发生皱瘪而失效,称之为屈曲。设计师需要知道导致屈曲的临界载荷的大小,可是用经典线性理论得到的数值却远高于试验值。②为了解决上述矛盾,理论上必须放弃小变形假设,而遇到求解非线性方程的困难;实验上对条件的控制和现象的观测要求有高的技术。钱学森系统总结了前人的工作,剖析了优缺点,利用当时可能得到的实验数据,认为应当考虑有限挠度的影响,采用能量法求取屈曲临界载荷。

钱学森首先研究球壳失稳的问题。他猜测,经典理论之所以失败,在于没有考虑到在加载过程中球壳除了保持球形位形以外,还可能存在多个位能更低的其他位形。壳体受到外界干扰时,会从位能高的球形位形跃变到位能较低的位形。他认为:有必要区分经典线性理论所给出的“上”屈曲载荷以及使壳体发生有限变形的“下”屈曲载荷。前者可以在试验中小心避免初始缺陷而达到,而在设计中所采用的临界载荷只能是后者。钱学森提出和运用上述能量跃变原则,得到的“下”屈曲载荷值确实和试验值很接近,因而被工程界接受。

1940 年,钱学森进一步将能量跃变原则推广到应用更为广泛的柱壳的情况。他为了求取圆柱壳屈曲的临界载荷,寻找壳体可能达到的位形,进行了大量推导和演算,手稿长达 800 多页;然而正式发表的论文却只有 10 页。难怪在完成这项研究时,他在存放手稿的信袋上用红笔写下了“Final”,即“最后的定稿”。作为一名严肃的科学家,他意识到该理论仍有不足之处,因此他又写下了“Nothing is final”这几个醒目的字,其中含有深刻的哲理。

4. 跨声速流动

1940 年以后,钱学森又把主要精力放在空气动力学的研究上。为突破声障,研究跨声速流场是个重要课题。他在 1944 年和 1946 年发表在“NACA Technical Note”上的两篇文章是跨声速流动理论的经典文献。前一篇中他讨论了跨声速流场中的极限线;而与郭永怀合作的第二篇则提出了上临界马赫数的重要概念。

对于给定机翼外形,当均匀的气体来流马赫数逐渐提高到某一临界值,飞行体附近的最大流速会达到局部声速,人称临界马赫数。钱学森和郭永怀认为,如果继续提高来流马

赫数,飞行体附近出现超声速的流区,流动仍然会是连续的。当来流马赫数进一步增加,突然会出现不连续的流场,并出现激波,这时的来流马赫数可称为上临界马赫数,它标志着流场从连续分布到不连续分布的突变,而前面那个临界马赫数则称为下临界马赫数。应当说,真正有实际意义的是上临界马赫数,而不是以前大家所注意的下临界马赫数。因而上临界马赫数这一概念的提出乃是空气动力学的一个重大发现。

这个重要概念的提出固然是个大胆的设想,但是要论证和计算它的存在则会遇到数学求解的困难。描述运动的偏微分方程不仅是非线性的,而且流场中同时出现亚声速和超声速两个相邻的流区,数学上分别对应椭圆型和双曲型的偏微分方程,钱学森和郭永怀克服了困难,得到了包括亚声速和超声速流区的整个混合流场,从而进一步确定了上临界马赫数的大小。

5. 稀薄气体力学

40年代中期,钱学森考虑到远程喷气飞机的最优飞行高度可达 100 km 左右,那里的空气非常稀薄,不能当作常规流体力学中的连续介质看待,必须运用稀薄气体力学的概念和方法来指导设计。为此,钱学森于 1946 年发表了“Superaerodynamics——Mechanics of Rarefied Gases”。这篇论文首先介绍了分子运动平均自由程 l 的概念,并用 l 与物体的特征长度 L(或边界层厚度 δ)之比 l/L(或 l/δ)形成一个无量纲常数,在由马赫数 *Ma* 和雷诺数 *Re* 构成的平面上,以 l/δ 为指标把该平面划分为四个区域:自由分子流区、过渡区、滑流区和气体动力学区。于是,不同的流动问题可以由 *Ma* 数和 *Re* 数两个数值来判断属于哪类流动。接着,作者分别讨论了滑流的应力和边界条件、小 *Ma* 数滑流的边界条件、大 *Ma* 数自由分子流以及流过倾斜平板的自由分子流及平板的升力和阻力系数。钱学森在这篇论文中所提出的关于流动区域的划分被认为是研究稀薄气体力学的开创性工作。

6. 火箭和喷气推进技术

钱学森到 Caltech 做冯·卡门的博士生的那年,他的师兄马林纳(F. Malina)等三人满怀希望地向导师冯·卡门提出一个非同寻常的要求,希望支持他们研究探空火箭,以便能够探测高度达到 30~80 km 处的宇宙射线和气象信息。冯·卡门深知火箭的重要性,便同意他们可以利用实验室的设备,并答应马林纳的要求,做火箭推进和飞行特性方面的学位论文。

钱学森在一旁对他们的工作观察了一年以后,第二年即 1937 年,也决定参加他们这个火箭小组。他参加试验,并担任理论家的角色,为小组设计和改进小型液体推进剂火箭,分析计算燃烧室的温度、燃烧产物的膨胀对火箭效率的影响、发动机的推力、火箭的理想效率等。

当时火箭的技术水平是不高的,估计火箭可达到的高度只有 3 km ,不能满足探空火箭的需要。这就促使钱学森探讨采用什么样的发动机和燃烧方案可使火箭既经济又高效

地达到更高的高度。1939 年他发表了“Flight analysis of a sounding rocket with special reference to propulsion by successive impulses”(他的博士学位论文的第四部分),探讨和论证了采用逐次推进的方案可达 30 km 的高度,以便观测大气层的结构以及大气层外的物理现象。

1938 年 5 月,美国陆军航空兵司令阿诺德亲临 Caltech,对火箭研究表示关心;秋天,阿诺德进一步要求他们研制用火箭助推重型轰炸机起飞的装置。经火箭小组的努力,终于在 1941 年 8 月的试飞中取得成功。钱学森在研究计划的制订和研究实践中,都做出了重要贡献。

冯·卡门、马林纳、钱学森和索莫菲尔德除了研究火箭外,对其他推进方式也很感兴趣。1944 年,他们的研究得出结论:无论导弹或航天飞行,最好采用由涡轮式和冲压式两种喷气发动机的组合作为第一级动力装置,以便充分利用大气层中足够的氧气;而火箭装置应该在越出大气层后才开动。这年春天,他们向军方呈交了研制冲压式发动机的建议报告。

7.《Toward New Horizon》——第二次世界大战后美国空军建设远景发展蓝图

1945 年,以冯·卡门为首的科学咨询团为美国陆军航空兵完成了题为《Toward New Horizon》(迈向新高度)共九卷的带有展望和规划性的报告,为“二战”结束后美国空军的现代化提出了远景发展蓝图。作为咨询团核心成员的钱学森为《迈向新高度》提出了他自己的观点和思想。他总结了欧洲国家的研究经验,并且结合美国的研究经验,特别是他们自己的工作,在该报告的第三、四、六、七和八卷以及技术情报附录中,详细论述了有关高速空气动力学、脉冲式空气喷气发动机、冲压发动机、火箭、超声速箭形翼导弹以及核能作为飞行动力的可能性等方面的研究概貌、存在问题以及发展前景。这份报告为二次大战后美国代替德国在航空科技的领先地位,以及在 20 世纪下半叶美国空军称霸世界奠定了重要基础。

钱学森对美国航空科学的发展所做的贡献是不可抹杀的,也为他后来回到祖国发展中国人民自己的航空航天事业做好了充分准备。

8. 加州理工学院喷气推进中心的创始人

1949 年,古根海姆基金会任命钱学森为加州理工学院喷气推进中心主任,并且赋予他以美国火箭先驱 R. H. Goddard 命名的喷气推进教授的荣誉称号。该中心有以下三个主要任务:①培训青年,为将航空技术推向新阶段培养先驱者;②研究喷气推进新思想,为新阶段的坚实发展提供基础知识;③促进喷气推进在和平时期的商业和科学方面的应用。

在很大程度上由于钱学森的坚持,中心的学科对象是航空工程和机械工程之间的交叉学科。中心设置的课程全面覆盖喷气推进系统的基本原理和飞行器的性能;研究课题则围绕喷气推进飞行器研究的前沿课题,诸如热应力和高温材料,热交换和冷却,燃烧稳定性和化学反应的平衡和动力学,喷气推进飞行器的性能等。经过中心培养的许多人员

后来成为美国航空技术研究单位或军事部门的骨干。

9. 工程控制论

1949年,维纳(N. Wiener)的"Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine"(控制论)一书出版,开创了控制论这样一门新的学科,其对象是研究一个系统各个部分之间相互作用的定性性质及整个系统的运动状态。

钱学森具有从弹道火箭到可控和制导火箭技术的丰富的研究经验,敏锐地认识到维纳开创的控制论的重要性,很快便运用控制论的原理解决了一批喷气技术中稳定和制导系统的问题,诸如火箭喷管的传递函数、远程火箭的自动导航以及火箭发动机燃烧的伺服稳定等问题。钱学森意识到,不仅在火箭技术领域,而且在整个工程技术范围内,几乎到处存在着被控制的系统,很有必要用一种统观全局的方法,来充分了解和发挥上述导航技术和控制技术等新技术的潜在力量,以更开阔的眼界用更系统的方法来观察有关问题,从而揭示前所未有的前景。于是,钱学森提出了一门新的技术科学——工程控制论。1953年底在 Caltech 开设了"工程控制论"课,接着于1954年出版了专著" Engineering Cybernetics"(工程控制论)。该书的出版在世界科技界引起广泛注目,随即被译成多种文字出版发行。

10. 物理力学

钱学森在探索超声速飞机以及喷气推进飞行器的性能和原理的过程中,需要知道介质和材料在高速和高温状态下的成分和性能,可是实验得不到这些数据。钱学森应用统计力学、光谱学和化学动力学,研究了气体和液体的平衡和输运性质以及气体的热辐射性质等,开辟了一条通过技术科学解决工程技术问题的新途径。

第二次世界大战中原子弹的使用,引出了核反应工程的新领域,这里需要知道介质和材料在极高的压力和温度状态下的性能和行为,同样存在上述缺乏数据的困难。

钱学森敏锐地意识到,在火箭技术、核能技术等重要领域,迫切需要高温、高压、超高温、超高压及放射线作用等条件下介质和材料的性质,诸如本构关系、输运性质及化学反应的平衡和动力学的数据等;然而实验却遇到很大困难。钱学森考虑到近代物理和化学的发展,对物质在原子核以外的微观结构已有相当的了解,有条件建立一门新的技术科学,即物理力学。其目的是通过对物质的微观分析,把有关物质宏观性质的实验数据加以总结和整理,找出规律,得到需要的数据,而且可以预见新型材料的宏观性质,为发展新材料和新工艺服务。

1953年,钱学森发表了"Physical mechanics—a new field in engineering science",正式提出了物理力学这门新的技术科学。1956年在他创建的中国科学院力学研究所里成立了物理力学研究组,他亲自下功夫培养第一批物理力学的研究人员。1962年他编著的《物理力学讲义》出版,系统介绍物理力学的基本概念和研究方法,也介绍了他自己所做的有代表性

的工作。1958年，中国科技大学成立，由钱学森主持，设置了物理力学专业。1963～1965年三届学生连续毕业，许多人被输送到力学研究所，成为该所物理力学研究室的生力军。

从钱学森倡导物理力学的研究至今已有半个世纪。自然科学界的方方面面都已认识到，研究复杂的问题均需要走宏观与微观相结合的道路。回想当年，钱学森曾把潘纳(S. S. Penner)请到加州理工学院，用光谱方法探测和研究喷气发动机的燃烧过程。1961年，潘纳创办了新的学术期刊“Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer”，这标志钱学森所提倡的“定量光谱学”已成为一门新学科，物理力学在美国早已开花结果。

今天，钱学森所倡导的物理力学这门宏观、微观相结合的学科的核心思想正在更广泛的范围内蓬勃发展。

三、对中国发展技术科学的贡献

从上面介绍的钱学森回国前在美国的一段研究经历中，我们可以看到，钱学森的科学工作早已越出力学这个领域，而把力学与其他学科结合起来，开创出像稀薄气体力学、喷气推进技术、工程控制论、物理力学等新的技术科学，并提倡核动力工程等其他技术科学。

早在1947年夏天，钱学森回国给浙江大学、交通大学和清华大学三所著名大学做“工程和工程科学”的讲演，目的是宣传工程科学的重要性，反映出他急盼祖国繁荣昌盛的赤子之心。讲演回顾了20世纪上半叶科学技术的研究越发成为决定国家和国际事务中的关键这一震撼人心的历史事实，其中最富戏剧性的实例乃是第二次世界大战中雷达和原子弹的发展，对世界民主力量的伟大胜利所做出的卓越贡献。钱学森意识到：纯科学的发现与工业应用之间的距离已经很短，而留长发的科学家和留短发的工程师之间的差别也非常之小，他们之间紧密合作的实际需要产生了一类新人，那就是工程科学家，他们在纯科学与工程之间架起桥梁，运用基础科学知识解决工程问题。钱学森在讲演中系统介绍了工程科学的内涵、工程科学家的任务以及培养工程科学家需要接受什么样的教育和训练。

1949年新中国成立，钱学森历尽美国政府的阻挠和迫害，终于在1955年回到祖国。从此以后，钱学森积极提倡并指导工程科学的研究。在回国的第二个月里，就受命创建中国科学院力学研究所。他当时的建所模式不只限于力学，还包括自动控制、工程经济、物理力学等新学科，实际上是按照工程科学的框架模式来建所的。1956年起，钱学森和钱伟长一起创办了三期工程力学研究班；1958年钱学森和郭沫若、严济慈、华罗庚等一起组建了中国科学技术大学，开始大批培养工程科学家的工作。1957年钱学森在《科学通报》上发表了题为《论技术科学》的论文，按国内的习惯将“工程科学”改名为“技术科学”。论文进一步全面地论述了技术科学的范围、方法论以及人才培养和科学技术工作的组织等各个方面。他认为，虽然自然科学是工程技术的基础，但它又不能包括工程技术中的规律。

要把自然科学的理论应用到工程技术上去,并不是一个简单的推演工作,应该做科学理论和工程技术的综合工作。因此,有科学基础的工程理论既不是自然科学也不是工程技术,而是两部分有机组织的总和,这就是人类知识的一个新部门:技术科学。钱学森这里指的自然科学包括数学、物理、化学,以及生物学、地质学等科学。在谈到技术科学的研究方法时,钱学森强调技术科学研究离不开数学,但提醒青年注意,数学并不是技术科学的关键。真正的关键是对所研究问题的认识,要认识和分清现象的主要因素和次要因素。首先要收集有关问题的资料,特别是实验室和现场的观测数据,在分析资料的过程中充分依靠自然科学的规律,将它当作摸索道路的指南针,经过多次反复的理论和实验的过程,找出解决问题的途径。在上述基础上,就可以建立模型,模型不等于现象本身,但却吸收了一切主要因素,反映现象的内在机理。下一步乃是由模型演算得到具体的数据结果,最后还需要将理论结果和事实相对照,经受考验。在关于研究方法的一节中,他预见到电子计算机的发展前景及其应用威力,特别说明了电子计算机将会对技术科学的研究方法带来重要的变化。今天,人们已经普遍使用了"分析—实验—数值实验或分析"三位一体的研究方法,这说明半个世纪前钱学森的上述预见确实是高瞻远瞩。

《论技术科学》这篇论文还开列出一些新的发展方向,它们是:化学流体力学、物理力学、电磁流体力学、流变学、土和岩石力学、核反应堆理论、工程控制论、计算技术、工程光谱学、运用学(即运筹学)等。

半个世纪以来的实践证明,这些新的技术科学确实在国民经济和国防建设中发挥了重大的作用。

钱学森认为,科学研究应当领导工业前进,走在生产前头。但是不能不看到,当前技术科学的研究形势很不能令人满意。科学界、政府和民众对技术科学的性质、作用、重要性并没有充分的认识。一个极端是按基础科学的标准来指导和要求技术科学;另一个极端是把技术科学研究统统当成生产问题,干脆把研究工作撂在一旁。其严重后果是不断引进,而谈不上不断创新,又怎能做到科教兴国。今天,我们重温钱学森先生关于技术科学的论述是何等的必要。

四、结 语

从钱学森先生的科学实践中可以看出,他不但是一位造诣广博而精深的应用力学家和技术科学家,而且是一位具有远见卓识的战略科学家。他那深远的科学思想为我们这个时代的科学事业提供了丰硕的宝藏。我们应该深入学习和充分应用,在新世纪里把祖国建成繁荣富强的科技大国。

归纳起来,我们应当:

(1)学习和发扬钱学森一生进行科学研究的超前意识和务实作风。

(2)继承和发扬力学大师普朗特—冯·卡门—钱学森的应用力学学派的优良传统。

(3)努力开拓钱学森所倡导的研究近代力学的方向和道路,即:宏观和微观相结合,力学与其他学科相结合,数值模拟与实验和理论分析相结合。

(4)大力开展钱学森所倡导的技术科学的研究,提高我国的综合实力。

(5)刻不容缓地贯彻和落实钱学森所强调的理工结合的教育方针。

致谢:李佩教授、郑哲敏教授、朱兆祥教授和朱照宣教授对本文的撰写提出过很好的意见,作者在此表示感谢。

参考文献

1 王寿云. 钱学森文集.北京:科学出版社,1991

2 郑哲敏, 谈庆明, 涂元季, 等编.钱学森手稿.太原:山西教育出版社,2000

3 von Karman T. Aerodynamics. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1952

4 冯·卡门, 李·爱特生.曹开成译.上海:上海科学技术出版社,1991

5 钱学森.论技术科学.科学通报,1957(2):97~104

钱学森和中国空气动力研究与发展中心

焦安昌 钮颂镛

钱学森院士九十华诞即将到来,中国空气动力研究与发展中心在庆贺之际,满怀激情回忆他对气动中心建设的谆谆教诲和悉心指导,回忆气动中心按照他和郭永怀院士描绘的蓝图建设发展所取得的每一个成就。

钱老是气动中心技术建设的奠基人。气动中心的前身是中国空气动力研究院。早在1964年初,他就根据国家安全和经济建设的需要以及空气动力学事业发展的状况,建议成立全国的空气动力研究院,以"集中力量,形成拳头"。这个建议得到了当时主持科学技术工作的聂荣臻副总理的大力支持,并由此成立了十六个专业组。1967年8月,气动研究院筹备组正式开始工作,钱老亲自担任筹备组组长。自那时起至1978年5月到气动中心检查指导工作止,据不完全统计,钱老关于气动中心建设的讲话和信函有28次(件)之多,根据唐进倬、陈承厚纪录整理的材料(未经本人审阅)达45000字以上。以后他又多次给气动中心主任写信,要求对某些重要的技术问题及其发展动向予以关注。钱老为建设气动中心倾注了大量心血。气动中心30多年来的发展证明,他关于中心的性质、功能、任务、构成、设备以及长远科技发展等等的精心指导,是正确的、成功的,而且对于当前正在奋力拼搏实现"国家中心、世界一流"的目标仍具有重要的指导意义。

一、坚持为型号服务,同时兼顾学科发展

这是钱老为气动中心确定的性质和任务。他反复指出:"总的来说,我们明确了空气动力研究院,不仅承担导弹、飞机的气动问题,空间运载工具和载人飞船的气动问题也要搞……我们总的目标,必须解决这些问题。""首先是这个任务。当然也要为工农业经济建设方面做工作。""做好为型号服务的工作。就是要服务,如果有人不愿服务,就要说服他。"他还强调:服务"要有积极态度,不能用消极态度服务,不要等待……要想办法出主意","先行一步的研究要加强,要主动为型号工作,为型号设计提出意见,提出发展改进方向","应自己研究发展空气动力、气动力理论,提出新的设计思想,而且还应研究、改进、创造新的试验方法","气动手册还是要编一编,作为气动院,年年都有这个任务,这也是服务的一项任务。"与此同时,钱老又指出:"我们有个特点,是个学科性质的研究院……我们还要负责学科方面工作……就是学科方面的发展。"他进一步解释说:"不是单纯发展学科,

而是通过任务。气动力的发展,毫无疑问是通过生产斗争而发展的,通过实践的发展,有了大量的实践,做了许多气动力的工作,把实践加以概括,提高到一定理论。到一定时期,应在某一方面做好总结,包括部分在型号设计部门工作的气动力工作人员,看哪些需要系统化,上升到一定理论,写成文章,小册子,或写书。这个工作,我们责无旁贷……我们要关心这项工作,并把它组织起来,总结提高。”

由此可见,钱老认为中国的空气动力学:①首先应当是为型号研制和使用服务,提供气动数据,解决气动问题,实现型号使命;②这种服务不是消极等待,而应积极主动。为此,要研究、改进、创造、发展新概念、新理论、新方法、新技术,要深入型号使用部门了解需求,要提出改进型号气动设计和其他有关方面的意见建议,要整理编写《气动手册》;③努力为经济建设做工作;④通过为型号服务促进、推动空气动力学学科发展,学科发展要源于型号、用于型号,重要的是做好总结提高工作。

气动中心始终把为型号服务放在首位。30多年来,想型号所想、急型号所急、帮型号所需,一直是研究试验工作的一个重要指导思想;在经费投入相当有限的情况下,充分利用和挖掘技术资源,保质保量按时完成了100多个各种型号的研究试验任务,解决了一大批型号气动问题。特别是在20世纪70年代中、后期,积极参加钱老亲自发动并指挥的解决再入气动防热问题的“淮海战役”,同时完成通信卫星及其运载火箭的特种试验任务,保证了我国火箭发射和第一颗通信卫星发射的成功;以后又着力于多个新型先进航空航天型号全面的气动研究试验,提出改进、提高气动性能的建议,使它们能纷纷“上天”;20世纪90年代全方位投入“神舟”号载人飞船与气动相关的各项研究试验,为飞船顺利发射和返回做出了重要贡献。为了更好地为型号服务,坚持开展包括研究方法和试验技术在内的尤其是有重大应用背景的多个重点项目的预先研究,增强技术储备。此外,还努力开发军转民和军民两用技术,积极为国民经济建设服务。当前,国防科技和工业体制调整以后,正在紧紧把握重大发展机遇,除了继续努力为型号服务以外,还把气动研究试验工作进一步推进到为型号使用服务的领域。气动中心以为型号服务带动学科发展。建立改造了包括计算空气动力学在内的有关研究手段,使学科发展有更坚实的物质基础;把型号研究试验中发现的现象和问题列成课题,进行深入研究,以识别气动现象和问题,弄清其原因和机理,提出利用或抑制、改进的措施;大力支持基础研究和应用基础研究,尤其关注空气动力学前沿课题以及与其他学科交融的课题的研究进展;对为型号服务的科技工作加以总结提高,编写出版专业书籍和文集。

实践证明,钱老对气动中心性质和任务的定位是完全正确的。气动中心将坚持这个方向,积极主动地为型号的研制和使用服务好,为经济建设服务好,并通过这种服务来促进空气动力学学科的发展。

二、发展三种技术手段,综合解决气动问题

这是钱老为气动中心技术资源建设和技术能力发挥所明确的途径。1968 年 2 月,他在谈到“我国空气动力工作应该怎样组织”这个重要题目时说,“经典的有两个主要方法,风洞试验和自由飞试验。现在要研究有没有第三种方法,用计算机算出数据来。”到了 4 月他明确指出:“认识在逐步发展,研究空气动力学有三个途径,越来越明朗。只强调风洞的作用不太好,要改进技术,三个途径都要强调一下。三种方法都要进行改进,进行研究。”1977 年 7 月,他进一步指出气动中心完成任务的组织形式是“任务→分解(风洞试验、自由飞试验、计算)→结果分析→报告”,还要求气动中心设立承接型号研究试验任务、解决型号气动问题的总体部。

钱老关于通过综合运用这三种手段并建立和加强总体工作来研究解决型号气动问题的思想,是关注计算空气动力学的出现和发展的认识结论,也是从中国的国情出发的,是一条投入较少而效益较高的路子。他对三种手段的建立和使用还提出了一些重要的观点。关于风洞,一是要建设大风洞。他认为,别的“可以得到趋向性的东西,但都靠不住,最后还是要用大模型试验”;二是要发展高速度风洞。他指出,“航空的速度增加,地空型号的速度也要增加”,型号“要提高速度,让他(敌人)来不及反映,一看见,跑就来不及了”,风洞“靠 AT-1 就不行了,要提高速度,要 6 倍声速,8 倍声速”,“再入的速度才是真正的高速度”;三是要进行气动与推进的一体化试验。他说,“空气动力研究院可以把冲压发动机试车装置捎带上”,“是否需要建造能安装带发动机的模型的试验风洞,要弄清楚。这种风洞投资很大,是不是需要,有没有其他办法? 如果需要,不怕投资大,还是要搞”;四是他强调“应当尽量应用新技术”,“风洞运转主要靠自动化,数据测量和处理要自动化”,“第一流的新型电子化,就是全面实现新技术”。关于计算,他的看法,一是“不是只算算,而是为型号解出数据服务的”;二是“这个行当无所谓低速、高速……再高速中也有层流,层流就是低速问题”;三是“要向更高的阶段发展,高温、电离、磁场作用都要搞”,而且“理论和试验风洞(结合)在一起”;四是“和计算机的结合”,同时“计算方法研究很重要”,“还是两个结合”。关于飞行力学和模型自由飞试验,他认为当时“飞行力学是个空白,而且是个大空白。”因此,他给郭永怀院士写信说:“关于气动院的飞行力学及自由飞工作我们经验极少,做起来困难会更多些,但一定要搞,是国防科学技术所需要的。”他在信中还指出,要做“三个方面的工作,即①用火箭橇来进行气动力及飞行力学试验;②用火箭在导弹飞行靶场把模型打入空中来进行气动力及飞行力学试验;③用特种专门的试验飞机或结合新型飞机的试飞来进行气动力及飞行力学试验。”他还在讲话中多次谈到自由飞试验问题。他说,“模型自由飞,要重视它,外国人也重视它,没有放下。飞机上那些比较“绝”的布局,除了风洞试验,还是要做模型,没有别的办法……我们发展自己的飞机,要发展模型自由飞这

种办法”,“用自由飞工具,解决风洞吹风所不易解决的气动问题。着眼于气动力数据,定常和非定常的”,“重点是模型的设计及制造,以及试验工作的抓总协调”,“有了实验数据……工作是分析整理。”

气动中心按照钱老指明的途径,建立了由40余座风洞组成的速度、尺寸基本配套的风洞设备群,具备了与当前和近期型号研制相适应的试验能力;建立了由巨型机和微型机组成的、总规模每秒运算达数百亿次的计算机群,开发了工程实用的型号气动数值计算的平台,并在计算方法的研究上取得了突破性的进展;还克服了各种困难,建立、保持并适度发展了模型飞行试验能力。综合运用这三种资源和能力,发挥整体优势,卓有成效地承担和完成了大量型号研究试验任务,范围涉及天、空、地、海,内容包含力、热、电、光,成为型号气动工作的主干。近几年来,又通过编制调整设立了总体技术部和总体研究室,解决型号气动问题的顶层设计和总体技术工作取得了长足的进步。

三、搞好设备设施规划,加强“技术后方”建设

钱老从一开始就高度重视气动研究院(气动中心)建设规划的制定,并与郭永怀院士一起亲自抓这项工作。可以说,他的讲话和信函大部分都是围绕规划的制定和实施的。他说,“要做好规划,包括规模、动力”,“要搞好计划、规划……主要是从计划、规划、体制入手,要有细致、深入调查研究的工作作风。”他在30多年前提出的一些观点至今仍有重要的现实意义:第一,一定要弄清型号部门的需求。当时他对航天的需求心中有数,“估计问题不大了”,而“对航空的要求没有底”,因此多次指出要“很好了解一下”,“看他们需要什么,千万不能人家要时我们还没有干起来。”第二,设备建设、研究工作必须考虑整个国家的体制和布局,要分工协作,不要重复浪费。他针对当时情况,具体说明了气动研究院哪些该做、哪些不要做、哪些由自身来做、哪些协助别的单位做、哪些完全由其他有关单位做的分工划线,还指出“风洞建设肯定不能分得太散”,“我们讲集中,不是为了自己,而是为了国家”,“太分散不行,太集中也不行”,“但是要有一个限额”。第三,设备建设、研究工作必须先行。他多次说:“我们不出型号,我们的难度就是要比出型号还得想得远些。我们的周期长,不能只考虑当前……要抢在型号前面,要看到国际形势的要求。”“现在空气动力工作远落后于型号发展的需要。”型号“要上天,又没有必要的试验设备,一步落后,就会步步落后。不能这样,总是我们气动试验设备落后于型号研制,我们一定要把试验设备提前搞上去。”第四,“技术后方”的建设要跟上。他说,“这些年的教训,有风洞,还要靠其他做辅助,才能完成任务。”“总结工作经验。我感到这十几年的工作经验有这么一条,一定要重视技术后方,试制加工力量……风洞的改进维修维护,模型制作,测量仪器的改进,仪器的加工,这些工作千万不能轻视。过去我们在这方面吃过亏,认为风洞建好了就万事大吉。风洞建了不少,要充分发挥其作用。上述那些是气动力单位的技术后方……与工作

需要不相称、不配套,直接影响我们正常工作的进行……请同志们总结一下,现在这方面力量距需要差得很远。”他还十分关注风洞的动力系统和真空系统,包括电力供应的问题。他同样重视科技情报信息工作,倾向于成立专门的情报机构,并同气动中心所具有的学科性质联系起来,认为这样做是“照顾到学科”,“可以做学科的工作”。

钱老对风洞设备建设给予了更多、更具体的指导。他把风洞分成四类,“一种是用连续式的风扇,吹风时间长;一种是暂冲式,几分钟的,25 个大气压;一种是放电的,用 100～200 大气压的高压气体;一种是脉冲式,放电激波管、激波风洞、放电风洞,包括轻气炮。……第一种特点是设备大,用电多,长时间工作;第二种是蓄气式的,连续功率并不大;第三、第四种是蓄能装置,功率不大。四种类型可以分开摆。”他提出,“要明确要求,这些风洞试验设备不是做研究用的,而是要满足上述型号研制所必需的吹风要求。”不仅如此,他还亲自对一些主要风洞给予方向性的指导。例如他指出,“7 米 × 7 米低速风洞,稳定段里还要放个模型”,即搞两个串列的试验段;“3 米 × 3 米的低速风洞,要把湍流度降下来”;“柔壁风洞技术得加把油”;“变密度风洞,要同 2.4 米跨声风洞结合起来干”;“高超声速风洞、激波风洞不是研究性工具,而是要为研制的型号拿出成果拿出数据”;“高超声速风洞、电弧加热风洞、激波风洞……要搞相当大的。”“激波管……达第一宇宙速度,到 8 千米/秒,解决驻点焓值……激波风洞,试验段直径 2 米左右,达第一宇宙速度”;“自由飞风洞(指自由飞弹道靶)还是干”,“轻气炮要搞,是有用处的。我们国家要搞,这是有用处的设备”;“电弧加热器焓值还要提高,要向高焓努力”(在另一处提出要到 7000 卡/克);“低密度风洞要到 50～160 公里”;“高温结构风洞还要研究。如果行的话,还有个加热方法问题。”此外,他还专门指出,“空气动力研究院搞风洞设备的设计,一直到结构设计,包括测量和控制。”“有一条经验,就是抓总体的重要性。搞出任何一个东西,总体抓不好,东西就出得慢,扯皮多……风洞也够复杂的。要达到吹风的目的,不光是气动设计,还有测量问题。气动、结构、测量系统、安全检验系统、数据处理系统,还有什么系统,要协调起来。若没有抓总体的,这个风洞设计不好。”因此他认为气动中心要“把搞设备设计的力量集中起来,是设备设计的总体部……拿出新风洞及其他设备。”

气动中心的风洞设备正是按照钱老的想法逐步建设起来的。已经建成的风洞群为国际同行所瞩目,尤其是 8 米 × 6 米大型低速风洞、2.4 米大型跨声速风洞、2 米激波风洞、200 米自由飞弹道靶等已跨入“世界级”风洞设备行列,成为我国空气动力学在国际上争得一席之地的重要标志。而且,钱老所要求的大型高超声速风洞、超大功率电弧加热器以及立式风洞等在庄逢甘院士等的大力支持下已被批准立项,即将建设,完成后必将进一步增强我国气动研究试验的能力。30 多年来尽管事过境迁,国际国内情况发生了巨大变化,科学技术呈现出革命性的进步,但钱老关于风洞建设的技术思想却是高瞻远瞩,经受住了历史的检验。

这里还应指出的是,钱老对于提高风洞速度和开展再入目标识别研究试验提出了重要的技术思想。关于前者,他强调要走脉冲式装置的路子。他认为“真正解决高速气动问题,还是要靠几毫秒的脉冲风洞。下定决心,坚决地走这条路。炮打风洞也是一种手段,但最后解决问题是不是靠它?如果最后不解决问题。还是不能靠它”;他主张发展脉冲放电风洞并说“看来污染问题可以解决”,以及“激波膨胀管,一边打,一边抽,后面用低分子泵设备抽,达到第二宇宙速度,11~12千米/秒”;他指出以后再高的速度“还是顺着这个杆爬,还是用这个办法,脉冲式几毫秒的。达到速度增高的办法,是用磁流体加速,采用电火箭技术,也是脉冲放电,利用电磁流体的收缩效应,使速度达到100千米/秒。做大模型,大能量,大约储能要100亿焦耳。这条路走得通。将来还是搞毫秒级的测试技术,搞大能量的储能装置。搞激光的人也需要这种装置。超过第二、第三宇宙速度,还是采用这个途经,脉冲放电。一般储能为几十亿到一百亿焦耳。”由于客观条件的限制,气动中心对于脉冲放电风洞只做过初步论证,激波膨胀管也在摸过一阵子后放下了。但是,从长远发展的观点看,钱老的这个思想是值得重视的。关于目标识别,在当时有专门的研究机构的情况下,他认为更多的工作应由这个机构去做。但他指出,“最需要的是搞尾迹研究的。弹道式再入的尾巴,电子密度有变化。”“对敌人的目标要识别;我们的目标不让他(敌人)识别;反导上去打到没有,要马上反映下来;(还有)对地球人造卫星的识别……任务就是这么四条……其中有些项目由气动院解决。”“识别所要解决问题,不是纯气动力问题,而是由各种电磁波和弹道周围流场作用,这是取得识别的一种方法,气动加上电磁波的作用,即相互作用……研究电磁波与等离子体,要完成这个任务,需要试验设备……照现在的理解,弹道靶肯定要建。小型电弧风洞建不建,再研究。若不是单纯流场,而要用激光、红外线……还可以建,但尺寸要有一定限制。”在当前的形势下,包括气动中心在内的气动单位和气动工作者应当更加重视这个问题,加倍努力,克服困难,力争取得更大、更好的成果。

四、认清历史责任,争创世界一流

钱老始终关心着气动中心的建设发展,特别是1978年5月他与当时的国防科委主任陈彬一起到气动中心视察,检查指导工作。年近古稀的他在长达15天的时间里走遍了每个角落,深入建设工地、研究室、实验室、车间、学校、机关,进行调查研究,并在干部大会上发表了十分重要的长篇讲话。在这次讲话和以往历次讲话中,除了上面已经提到的以外,他强调要认清历史责任,说全国四个现代化,气动中心“占了两个现代化,国防现代化和科技现代化……是全国最大的气动力研究单位……应充分认识到,地位光荣,责任重大……我们的思想和行动,一定要与之相称。”“我们的工作是很花钱的,要感到责任。我们的责任很重,搞得不好,完不成任务,浪费了,辜负了人民的期望”;他明确四项任务:“第一条培养人;第二条是研究方法,三种方法;第三条,不仅为型号研制服务好,还要做好先导性工

作，提建议，供他们参考；第四条，要总结，出东西，还有学科任务”；他非常重视科技队伍建设，不仅把它列为第一项任务，而且要求科技干部“在学习任务中，要加上唯物辩证法的任务……这是完成任务所必须的一种工具。一定要学一点辩证主义”，“要学习，干中有学……要敢干，不要等。不懂，就边干边学。要只争朝夕。”认为气动中心“……现在是青黄不接，要培养，解决各行业力量不足的问题……要带研究生”；他希望把气动研究试验组织管理好，指出“组织管理现代化科学技术本身就是科学技术”，各级领导机关要“学一点这门学问。当然同时也应学一点空气动力学，先搞点常识”，并提出学习《科学、技术、管理》这本书，“搞一本，几个人一本，看看。这本书讲的是如何管理科技。”还特别指出设备建设和研究试验“需要的就坚决干，不需要的就坚决不干。有所不为才能有所为，要集中力量打歼灭战”；他要求工作中一定要勤俭节约，“勤俭节约要再提醒一下”，“为人民服务，要艰苦朴素”；他告诫要团结协作，“为全国型号研制服务”，“要团结全国气动力工作力量……要团结‘701’，沈阳还有‘626’，哈尔滨还有‘627’，还有高等院校，北大、清华，力学所，各型号研制单位。要考虑跟人家有什么矛盾，我们有一份责任。搞不好团结，我们要负责。”“要利用全国的力量”；他以强烈的民族自尊心和对科学技术的深邃洞察指出，“不一定外国人怎么干我们就怎么干。不能光凭苏联有，我们就干，要作分析。”“要敢于怀疑外国人的东西，要相信自己，相信我们能够赶过外国人”，“达到世界先进水平”。

气动中心虽然各级领导换了几届，队伍也有了很大变化，但始终牢记钱老的这些教导，坚持以科研试验为中心，加强全面建设，采取联合办气动专业、自己培养和委托培养硕士和博士研究生、压急难险重任务等办法使“青春方阵”迅速成长为主力军，通过多次必要的适应性技术改造大力提高为型号研制和使用服务以及为国家经济建设服务的能力和质量，完成各项气动研究试验任务，推动和促进空气动力学学科的发展。1993年9月，又提出“国家中心、世界一流”的奋斗目标，力争在设备能力、科技人才、创新成果这三个方面实现跨越式发展，跻身于国际先进行列。1999年4月，江泽民总书记为气动中心题词：“发扬无私奉献不懈攀登的风雷精神 为实现国家中心世界一流目标而奋斗”。在新世纪之初，气动中心一定遵照江主席的指示，努力再努力，奋斗再奋斗，把钱学森院士亲自提议并筹备建立起来的中国最大的空气动力学研究试验机构建设好，为中国航空航天事业和空气动力学事业的发展做出应有的贡献。

钱学森，这位在全球享有盛誉的中国伟大科学家的名字，将始终同中国空气动力研究与发展中心紧紧地联系在一起。

作者简介：焦安昌 1942年11月出生，籍贯北京顺义。1966年7月毕业于中国科技大学空气动力学专业。中共党员。现任中国空气动力研究与发展中心主任、高级工程师，政府特殊津贴享受者。主要成绩：①在担任中心低速所所长期间，始终瞄准一流水平狠抓预研项目，强调研究项目的实用性，先后组织

完成了10多项有实用价值的研究课题。同时,狠抓实验设备的改造,立足长远发展,先后组织了对8m×6m,4m×3m风洞设备改造工作,在经费十分紧张的情况下,挤出资金提前建成了ϕ3.2m风洞并投入使用,圆满完成了多项型号任务,使该所低速风洞试验能力和试验范围得到进一步提高。②担任中心主任之后,狠抓中心的全面建设和长远建设,对重中之重的2.4m风洞建设和重大任务紧抓不放,并亲自组织指导监督。另外,注意在发挥中心的整体优势和提高中心的综合科研试验能力上下功夫。瞄准空气动力学前沿,提出了中心在武器装备研制、飞行性能评价和高技术、新概念武器研究方面"三个有所作为"的发展思路,实现了风洞试验、理论计算、模型自由飞三大手段的有机结合,使中心的综合研究、分析、评估能力达到了先进水平,在我军武装装备研制中发挥了重要作用。

钮颂镛 1940年1月出生,江苏吴江人。研究员级高级工程师。1961年7月毕业于南京航空学院飞机系。中共党员。曾任中国空气动力研究与发展中心科学技术部部长、副主任,中国空气动力学学会秘书长,《气动实验与测量控制》期刊首任主编。主要业绩:20世纪60年代负责过我国自行研制的多种地空、空空、地地导弹的超声速风洞试验,参加过0.3m柔壁喷管风洞(我国首座)总体设计,并负责其中的气体设计和校测方案,期间编写了10余篇技术报告;20世纪70年代负责气动中心超高速所关于第一代洲际导弹弹头气动防热攻关以及第一代通信卫星姿态控制发动机研究试验的组织管理;80年代中到20世纪末,负责组织谋划气动中心科技发展并参与决策,负责该中心完成"神舟"号载人飞船等我国重要飞行器工程研究试验以及相应技术改造任务的组织管理,负责我国最大的2.4m×2.4m超声速风洞设计和首次试车的组织管理,主管该中心的国际科技交流与合作。曾参与我国空气动力学"七五"至"十五"预先研究指南以及21世纪初中长期发展战略的拟制。《气动实验与测量控制》曾多次被评为优秀科技期刊,并获部委级科技进步奖。还参加过《中国大百科全书》力学卷有关条目的编写工作。

钱学森与中国风能

贺德馨

一、要搞风力发电

1977年12月,我随庄逢甘教授为团长的中国航空学会风洞考察团访问西欧四国。回国后,考察团在向国防科委首长汇报到西欧一些国家的风能利用情况时,钱学森指示说:要搞风力发电,这个任务由你们风洞指挥部(中国空气动力研究与发展中心前身,以下简称“气动中心”)来搞。1978年3月在全国科学大会上,钱学森又对参加会议的气动中心代表王昌祺说:要搞风力发电。1978年5月,钱学森来绵阳检查气动中心工作时再一次指示我们要搞风力发电。1978年5月18日,钱学森在给韩志华的信中又指出:“我看风力发电的问题,具体到风力发电中空气动力学问题,应该列入计划,可让一所(注:低速所)干,成立课题组。”并要求在进行一段工作后写出报告,召开全国范围的技术会议,研究工作规划。不久,在低速所成立了风能研究课题组,开始风能利用的研究工作。

1980年11月,我参加了美国能源部在中国举办的“利用风力发电”技术座谈会。会后,我向钱学森汇报。他听了后说:要组织全国力量搞风力发电,要打破部门界线,协同作战。可以先通过中国科协的学会组织把全国有关的技术力量联合起来,召开一次会议来交流我国风能利用的情况,对研究工作提出建议,并要纳入到国家科技发展规划中去。你们要给老百姓做好事,像小水电那样发展10~20kW级的风力发电机,做到价廉物美,安全可靠,经久耐用。他还说,他的老师、著名空气动力学家冯·卡门教授曾对美国第一台1.25MW的风力发电机组进行了结构动力学方面的研究。

根据钱学森的建议,中国太阳能学会、中国农业学会、中国气象学会、中国力学学会和清华大学于1981年9月在北京联合召开了“全国风能利用学术讨论会”,有113人参加了会议,交流了35篇文章,会上还成立了风能专业委员会筹备组。1981年12月,中国科协批复成立风能专业委员会,并明确同时作为中国空气力学研究会和中国太阳能学会下属的学术机构。风能专业委员会成立后不久就接受了国家科委的委托,对“六五”期间我国新能源(风能)攻关项目进行了论证,并对1986~2000年我国新能源(风能)规划提出了设想,从“七五”开始,我国风能利用纳入了国家科技发展规划。

1982年3月,钱学森对搞风力发电提出了具体意见,他说:“风力发电有三个方面的工

作要做：第一是推广小型风力发电装置，即几千瓦到几十千瓦的。第二是几百、一千或几千千瓦的大风机。国外已不是什么大问题了，我们怎样掌握这个技术？第三是探索性的工作，请工业空气动力学专业委员会或风能专业委员会组织些力量，要一些有头脑的人来研究。要把风力发电研究做为四个现代化服务的一项工作，对此要有足够的认识。”

二、要推广小型风力发电装置

我国是一个发展中国家，人民的生活还不很富裕，有一些地区，特别是西部边远地区的农牧民还没有都用上电，钱学森十分关注那些地区的能源问题。

1981 年 2 月，钱学森在给能源研究会的一份题为《我国农村的能源政策》的报告中指出：“我国有 10 亿人口，有 8 亿农村人口……我们首先要看到农村不同于城市，人口稀得多，有广阔土地面积。所以发挥农村优势，就要利用密度低的能源，这就是利用太阳光和由太阳光能派生出来的能源。第一条道路是发展沼气，第二条道路是风力发电和水力发电……”。

1984 年 4 月，钱学森在来信中指出：“年初中央开西藏工作会议，决定要在西藏大力开发风能和太阳能，你们学会何不自告奋勇，向自治区报名争取先实地考察一番。”根据他的建议，风能专业委员会先后组织力量参与了西藏、新疆、青海、内蒙古、甘肃、福建、山东、黑龙江、江苏、广东等省（自治区）的风能开发和利用的可行性论证和技术咨询活动，特别是在甘肃（1984 年 8 月）、青海（1986 年 7 月）和新疆（1988 年 8 月）召开的三次利用风能开发西北讨论会，对推广小型风力发电装置，促进西北地区风能开发和利用起到了积极的作用。

钱学森十分重视小型风力发电装置产品的质量问题，他多次指出：风能研究要搞出价廉物美的商品，不要轻易随便上产品，要搞市场调查（预测）。1982 年 12 月，在一份小型风力发电机组鉴定的报告上批示说：“我认为工作要做得彻底些，在鉴定之前，要总结样机试用的经验，然后仔细改进设计，考虑到小批量生产的工艺技术，再经过实用。第二步才能鉴定定型，然后推广。这才稳妥，才能成功。每步要有报告。”后来，他又多次来信告诉我们：搞风力发电不能“学究”式（1982 年 7 月）。要造出实用的机器，还得是一位工程师，不能只是一位科学家，工程设计的创新就在于搞出结构简单可靠、造价低的机器，这里只注意空气动力问题是不够的（1984 年 2 月）。要开发就不只是研制，从技术上讲，产品要质优价廉才行，不然是站不住的。搞出耐用的产品不容易，请开发中心（注：指中国风能技术开发中心）千万注意。这可是实实在在的工程技术工作，要费很大的力气的（1984 年 10 月）。

实践表明，在我国，小型风力发电机组在解决有风无电地区农牧民生活用电方面起到了重要的作用。另外，小型风力提水机组在解决有风有水资源的地区的农田灌溉、种草植树、改造沙漠和人畜饮水的问题上也有良好的前景。从长远考虑，发展小型风力机组对改

善能源结构、保护生态平衡和充分利用资源等都有积极的意义。目前,我国小型风力机组技术已经成熟,实现了商品化。到2000年止,小型风力发电机组的装机容量已达17余万台。但是,在性能、成本、寿命和使用等方面还都有待改进和发展。另外,随着用户需求的提高和科学技术的进步,还要不断开发新的产品,如1~10 kW风力发电机组。

三、要建设风电场

钱学森在指出要推广小型风力发电装置的同时,还提出了要搞大型风力发电机组,要同全国电力建设结合起来的技术方针。在《我国农村的能源政策》一文中他就指出:“风力也有不稳定的缺点,单独靠风力发电要配蓄电池,投资就大了。最好是全国建成电网,把风力发电、水力发电、火力发电以及核电联合起来,同全国电力建设结合起来。”1982年2月,他在一封信中指出:“风力发电将来主要应用于电网,用蓄电池储能成本太高,并网问题应该做工作。”

1981年底,我在参加美国风能会议后写了一份技术小结,介绍了美国在加利福尼亚州发展风电场的情况。他看了以后来信说:“看了小结后,感到以前我们谈到过的有关风能技术的方针(注:指风力发电的最终目标是要搞对国家电力建设能起一定的作用的风电场)是对的。”

风力发电并网运行有三种方式:第一种是将单台中、大型风力发电机并入电网运行;第二种是将单台或多台中、大型风力发电机组与柴油发电机组组成风/柴系统并入电网运行;第三种是将多台大型风力发电机组组成风电场并入电网运行。目前主要是第三种。1983年,在山东荣城安装了3台从丹麦引进的55 kW风力发电机组,建设起了我国第一个风电场。1984年,钱学森得知福建平潭也要发展风电场后,非常高兴,要我与他的同窗好友、福建省电力设计院郑世芬总工程师联系,关心福建平潭开发风力发电。

为了贯彻钱学森提出的风能技术方针,进一步促进我国风能开发和利用工作,在国家科委的组织下,1984年11月成立了中国风能技术开发中心,该中心是在国家有关部委共同指导下的一个科研、设计、生产和使用的技术经济联合体。它的宗旨是为中国风能开发和利用提供先进技术、组织技术力量、协调攻关和开展基础研究工作,并同国外进行技术合作,及时将科研成果转化为生产力,提供使用,取得经济效益和社会效益,同时参与国家和地区风能发展规划和技术改造的咨询工作。

钱学森对中国风能技术开发中心的成立非常高兴,他在来信中说:“您们搞中国风能技术开发中心,我很赞成。”并指出:“中国风能发展的出路在于横向经济联合,而横向经济联合已是今年改革的一件要大力推行的事。”中国风能技术开发中心成立后,在上级的领导下,在钱学森的直接关怀下,在全体参加单位的团结协作和共同努力下,在国家科技攻关、地区风能开发、技术基础研究、对外技术合作和技术培训活动等方面都做了大量的

工作。

1988年初，钱学森看了中心撰写的一份《美国风电场调查报告》后，要我们把报告呈送国家能源部，并在来信中指出："要结合我们自己的条件，组织一个在我国开发风电场可行性的研讨会。"在他的指导下，中国风能技术开发中心组织了国内20余名专家，对中国风电场发展的规划方法进行研究，先后召开了4次研讨会，并于1988年底编写了一份10余万字的《小型风电场规划方法》报告，对我国风电场的建设起到了技术咨询作用。

1989年，在新疆达坂城安装了13台从丹麦引进的150 kW风力发电机组，在内蒙朱日和安装了5台从美国引进的100 kW风力发电机组，开始了风电场运行示范试验。从这之后，在全国各地陆续建设风电场，装机容量逐年增长。特别是国家计委提出的"乘风计划"，国家经贸委提出的"双加工程"和国家电力公司提出的风电场建设规划，对推进我国风电场建设起到了重要的作用。到2000年止，全国已建设了26个风电场，总装机容量达34.4万kW。目前，风电场的建设正在稳步健康地发展，并取得了较好的经济效益，为利用新能源和可用再生能源，改善我国电力工业的结构，打下了一个良好的基础。

四、风力发电要搞产业

近年来，我国政府把风电场建设放在电力工业发展的一个重要位置，加上国际上对我国开发风电的优惠政策，为我国风电场的发展创造了很好的条件，风电场建设有了一定的规模。但是，要使风电场持续、快速、健康地发展，还要解决好下面几个问题：①要实现大型风力发电机组的国产化，提高国产机组的性能、可靠性和可维护性；②要建立一个适应市场经济体制的，能促使风电发展的机制，并制定相应的政策和法规；③要进一步详查我国风力资源，选准风电场场址和改善风电场管理水平，以提高风电场的综合容量系数。其中，实现大型风力发电机组的国产化是最主要的方面。钱学森早在1990年就对我国21世纪的供电问题提出过重要的设想，他在9月份的一封信中指出："我最近又读到'Scientific American'1990年9月号地球能源专辑（中文译本叫《科学》），其中有文说全美国的用电可以通过充分开发本土上的风能来满足——要用400万台标准化的500千瓦机组。标准化是降低制造费用及提高可靠性以节省维护费，并说这样在美国现在风力发电成本每千瓦时为7美分，而新的烧煤火力发电站由于要加防污染措施每千瓦时也要5美分。风力发电成本在近期还可下降。风力发电的弱点是有季节及朝夕变化，不与用电时间需求相合，因此要靠调节的另一种电源。由此考虑，我设想我国21世纪的供电问题可以用以下方案解决：

(1)400万台标准化的500千瓦风力发电机组；

(2)充分开发我国大、中、小水电资源；

(3)烧燃料气的峰值供电气轮机发电机组。而燃料气来自化工等工厂，不是来自煤

炭,没有污染。另外,还可以考虑用些核电以补不足。

这是一个以风力为主干的电力计划,请你们审查,有无道理?当然,如要考虑此设想,先要有全面的规划,这要有国家的支持。而您们搞风能的同志则要研究:

(1)如何标准化以降低成本,提高可靠性;

(2)选点及建网,先利用现有设施做起;

(3)其他问题,如设备批量生产的组织。

总之,风力发电今后不能停留在小打小闹,要大干,从你们自己认识开步!面向21世纪的社会主义中国!"

1990年9月,我在能源部召开的"新能源(发电)工作座谈会"上,传达了钱学森的意见,引起了代表们的热烈反响,能源部的领导听了后亦十分重视。黄毅诚部长在能源部召开的一次风力发电场建设规划会议上明确指出:我们应当不失时机把风电提上议事日程。实行统一规划和组织领导,调动各方面的积极性,……使风力发电成为我国电力工业的一个方面军。

根据钱学森的意见,中国风能技术开发中心在原国家科委组织下,从"八五"开始进行了百千瓦级大型风力发电机组的概念设计和200 kW大型风力发电机组的研制工作。钱学森对我国建立风电产业一事十分关注。1991年8月,他来信指出:"中国风能开发的关键在于集中统一,再不能分散地搞'小炉匠'式的经营了!在《中国新能源和可再生能源》中介绍的风能单位就有198家!为什么不能组织起来,搞风能集团?"

我国风力机产业是从小型风力发电机组生产开始的,特别是内蒙古自治区,在自治区政府的重视下,采取补贴政策推广普及小型风力发电机组,扶植风力机产业。

为了加快大型风力发电机组国产化的进程,近年来,中央和地方通过扶植一些生产大型风力发电机组的企业,逐步建立我国自己的风电产业,到2000年止,我国已有6家公司在自选研制200~600 kW的风力发电机组,国产化率可达80%以上。风力发电机组是一项高技术产品,要依靠科学技术进步,风力发电机组制造厂(或总装厂)在加快大型风力发电机组国产化进程中起到了十分重要的作用。总装厂除了要协调好与用户的关系外,还要有自己的技术力量,抓好总体技术的开发研究。

五、要做探索性的研究工作

钱学森对风能开发和利用中的探索性研究工作一直非常重视,并给予具体的指导。早在20世纪50年代,他就提出了"风洞风车"的概念。它和一般形式的风力发电机组相比,可以在同样的风速下提高风轮的输出功率。他的设想比后来国外提出的扩散型风能转换装置要早十多年。

1978年,气动中心开始对旋风型风能转换装置进行机理研究。同年5月,钱学森在气

动中心低速所风洞中视察了旋风型风能转换装置模型试验。1982年3月,他在来信中向我们介绍了几种新概念型的风能转换装置,要我们组织些力量来研究。根据他的要求,我写了《关于新概念型风能转换装置研究工作的意见》的报告。他看后于1982年7月指出:"这些新概念型的风能转换装置主要是旋风型、气旋型和风车式的,可能还有别的方案。这些探索性的工作要由我们来做,真正实现了百千万瓦级的那就了不起了,意义就很大,当然不是短期内能实现的。这里边有一点很重要,就是文献中还没有提到的:这种风能装置不仅是气动力学问题,还有热动力学问题,是低温差、大流量的巨型热动力装置。作为一个科学工作者,应该认识到这个概念问题,要抓住它。这个问题解决了,从国民经济上看有重要意义,从科学技术上看也有重要意义。风能和热能结合起来,是大有希望的。"

遵照他的意见,风能专业委员会曾于1982年8月在北京召开了新概念型风能转换装置研究工作研讨会。会后,组织了有气动中心低速所、北京太阳能研究所、哈尔滨工业大学和哈尔滨建筑工程学院等单位参加的联合课题组,开始对气旋型风能转换装置(又称太阳能风能综合发电装置)进行可行性研究。在研究中自始至终得到了钱学森的亲切指导。1982年10月,他在来信中说:"用理论估算、计算,分析现有三种方案的性能,比较其优缺点,然后就可以改进得出更好的方案。再进一步可作局部模型试验,由此再改进设计,得出比较成熟的巨型风力—太阳能发电设计"。1984年2月,他在看完《太阳能—风能综合发电装置论证报告》后又来信说:"太阳能—风能综合发电装置采用什么风轮?我认为尽量用涡轮,提高转速,免去价格高昂的增速齿轮。如果简单的单级涡轮还不行,为什么不用我在50年代就提过的引射式风轮?请你们研究。"

1986年,我们开始对扩压引射式风能转换装置进行引导性试验,测定了扩压引射后在风轮处的增速效应。试验结果表明,这种方案是可行的。后来,中国科学院工程热物理所的计算结果亦表明是可行的。在此基础上,1988年研制了一台2 kW的扩压引射式风能转换装置,分别在12m×16m和8m×6m风洞试验段中进行整机性能试验。试验结果表明:扩压引射器使流经风轮的气流速度提高,在同样的来流速度下增加功率输出,另外这种装置的输出功率对风向的变化不敏感,在一定风向角变化范围内可以不考虑调向。

钱学森还亲自对一种斜轴式风力机的最佳轴倾角进行了计算,计算结果和德国设计的斜轴式风力机主轴倾角完全一致。以后,我国亦研制成功了这种风力机。

目前新概念型风能转换装置还处在科研阶段,但正如钱学森指出的那样,这项工作无论从科学技术上看,还是从国民经济上看都有重要意义,还要有人去做。

六、要重视风能技术交流和科学普及工作

1982年,风能专业委员会编辑出版了《风能通讯》,得到了钱学森的肯定。他在一封信中鼓励我们说:"我认为《风能通讯》办得很好,是你们风能专业委员会办的好事。"并指示

我们在《经济日报》新技术专栏上搞个风能的专版，以广泛宣传。根据他的指示，1984年3月和4月，我们为《经济日报》组织了两期风能专刊的稿件；为《人民日报》、《科技日报》和中央人民广播电台撰写稿件；并协助中央电视台拍摄了《风能》录像片和协助科教电影制片厂拍摄了《风能》科教片；举办了“风力机空气动力学”讲座；编写了《中国风力机图册》和《风力机结构动力学》；1986~1989年还与原成都科技大学合作举办了一期风能大专班。这些活动对在全国范围内普及风能知识起到了积极的作用。

风能专业委员会还主持和参与组织召开了全国和国际的风能学术会议，通过交流团结了全国各方面的力量，促进了全国的横向联系和技术协作，受到了各有关部门和广大风能科技人员的支持。

1996年，当钱学森得知在山东乳山要筹建新能源科普公园后，他写信表示祝贺。目前乳山新能源科普公园已被中国科协列入全国科普教育基地。

20余年来，钱学森对我国新能源(风能)开发和利用事业从发展方针、技术政策、研究目标和技术途径等各个方面都提出了重要的看法，实践表明这些意见是完全正确的。我本人有幸亲自聆取他的教诲和指导，不但从学术研究上，而且从思想方法上都受益匪浅。我希望有更多的人来研究和运用钱学森的学术思想，我亦希望有更多的人能为开发和利用新能源(风能)造福人类，为提高新能源(风能)技术水平而继续贡献智慧和力量。

作者简介：贺德馨 1940年1月出生。中国空气动力研究与发展中心原工程师，研究员，博士生导师。中国力学学会副理事长，中国太阳能学会常务理事，中国空气动力学会理事兼风能专业委员会主任。从事风工程与工业空气动力学研究工作。

微机电系统中气体运动的相似参数

樊菁 沈青

钱学森于1946年发表的题为《高空空气动力学——稀薄气体力学》一文中，提出了气体流动领域的划分准则，为现代稀薄气体动力学的研究做了开创性的工作。文章考虑到随着喷气推进技术的发展，飞行高度不再受到限制。远程喷气飞机的最优飞行高度估计在100km左右。那里的空气已经非常稀薄，不能当作常规流体力学的连续介质看待，必须运用稀薄气体动力学的方法指导飞机的设计。文章还讨论了稀薄气体动力学在诸如蒸馏和化工作业的高真空泵设计等方面的应用。钱学森的远见卓识已为现代航天工业和真空加工技术的发展所证明。

钱学森依据Knudsen数 Kn（平均自由程 λ 与流场特征长度 L 的比值）将流动领域划分为：连续介质区（$Kn < 0.01$），滑流区（$0.01 < Kn < 0.1$）、过渡区（$0.1 < Kn < 10$）和自由分子流区（$Kn > 10$），后三者统称为稀薄气流。他用粘性系数的表达式 $\mu = 0.499\rho\bar{V}\lambda$，把 Kn 数与Mach数 M 和Reynolds数 Re 联系了起来

$$Kn = \lambda/L = 1.255\sqrt{\gamma}M/Re \tag{1}$$

γ 是比热比。文献1研究了大、小 M 数稀薄气流。大 M 数情形是针对高空飞行的。小 M 数情形的分析，限于当时的技术水平，还只是一个纯学术的研究。

1990年以来，微机电系统（MEMS）成为国际研究热点。MEMS空间分辨率在微米量阶、时间分辨率在微秒量阶。我们周围世界中许多重要现象和过程的基本机制，正是在这个尺度发生的。过去一直缺乏有效手段进行观测和控制。MEMS技术的发展，为感知和控制这个微小世界，提供了一个很好的工具。现有MEMS，如微型马达、传感器、泵、阀门等，特征长度达到微米量阶。随着纳米技术的发展，更微小的器械也在积极研制中。对于这么小的装置，当流动介质是气体时，稀薄气体效应影响显著。也就是说，气体不再具有连续介质的行为，而要表现出分子离散运动的特征。另外，目前MEMS实验和装置中气流速度的量阶为1m/s，M 数的范围在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$。文献1所讨论的小 M 数稀薄气流中，稀薄气体效应对阻力、流量等的影响，正是当前MEMS所关心的。钱学森还指出：“毫无疑问，就所关心的流体本身而言，特征参数仍然是气体动力学中马赫数和雷诺数。”这个结论，对于目前广泛关注的MEMS中气流的数值和实验研究，有现实的指导意义。

为了了解微尺度流动特点，人们正在致力于发展微米尺度的测量途径。如Pong等人发展的两代微流动系统来测量微槽道（高为1.2μm，宽为5μm和40μm，长为3 000μm）中压

力分布。第一代系统有 4 个传感器,第二代有 13 个传感器,得到了微槽道中的压力分布。Shih 等人用类似的系统得到了高为 1.2μm、长为 4 000μm 的微槽道的压力分布。他们的结果显示了压力分布沿轴向的非线性,以及在较大 Kn 数下 Navier – Stokes 方程加滑移条件的不适用性。这对于人们认识微槽道流动的特性起了很大作用。

然而,由于 MEMS 尺寸很小,一般的实验观测非常困难。特征长度在微米量阶的气流特性是不是只能通过微型传感器测量? 可不可以通过加大尺寸以降低其中压力的途径来实验? 相似准则可以回答这个问题。相似准则传统应用方式是:在保持相似参数不变条件下,把被观测物体(如飞机、导弹),按比例缩小,以便风洞容纳。如此获得的气动力、热数据,一直是各种飞机、导弹设计的主要依据。我们可以相反的方式应用相似准则,进行 MEMS 气流的实验模拟。将 MEMS 尺寸扩大,以降低其中压力来保证模拟和实际 M 数和 Re 数的相同,这样实验观测就容易多了。

相似准则对数值模拟也有重要指导意义。微系统中的气体运动,由于特征尺寸微小,稀薄气体效应显著,因此连续介质假设和 Navier – Stokes 方程不再适用。直径模拟 Monte Carlo (DSMC) 方法是模拟稀薄气流的有力工具,在航天领域取得广泛成功。用 DSMC 方法模拟微尺度气流遇到的最大困难是模拟结果中的统计散布。量阶为 0.1m/s 的有用信息完全淹没在无规则热运动 (量阶为 10^3m/s)产生的背景噪声中。针对小 M 数稀薄气流,我们已提出信息保存法, 解决了统计模拟遇到的涨落问题。另外一种建议是:在保证可压缩效应可以忽略的范围内,适当增大模拟 M 数,以增加信噪比,减小 DSMC 结果中的统计涨落。这种做法实质是放弃 M 数模拟。对于 MEMS 中感兴趣的滑流领域和过渡领域,Kn 数和 M 数(分别分子特征长度和速度与流动特征长度和速度之比) 的相似都要保证。因此, Hadjiconstantinou 和 Garcia 的做法违背了相似准则,是不可行的。

以低速小球绕流为例。Millikan 以及许多研究者通过大量的实验测量,给出了整个流动领域的一个阻力系数实验数据拟合公式

$$C_D = \frac{12}{Re}\cdot\frac{1}{1 + C_0 K_n}, \tag{2}$$

其中:$c_0 = \alpha + \beta\exp(-\gamma/Kn)$,$\alpha,\beta,\gamma$ 是常数。在连续介质极限 $Kn\to 0$, $C_D = 12/Re$,公式(2)退化为 Stokes 公式;自由分子流极限 $Kn\to\infty$, $C_D \sim (ReKn)^{-1}\sim M^{-1}$。在这两种极限情况下,相似参数只有一个,分别为 Re 数和 M 数。然而,在滑流区和过渡领域($0.01 < Kn < 100$)有两个相似参数:Re 数和 Kn 数。由于关系(1),相似参数也可以是 Kn 数和 M 数,或 Re 数和 M 数。后者是气体动力学常用的。

参考文献

1 Tsien H S. Superaerodynamics, Mechanics of rarefied gases. Journal of the Aeronautical Sciences 13, 1946. 653

2 Pong K C, Ho C M, Liu J Q, Tai Y C. Nonlinear pressure distribution in uniform microchannels. ASME - FED. 1994.197: 51

3 Shih J C, Ho C M, Liu J Q, Tai Y C. Monatomic and polyatomic gas flow through uniform microchannels. ASME - FED. 1996.59: 197

4 Fan J, Shen C. Statistical simulation of low speed unidirectional flows in transition regime. in Rarefied Gas Dynamics, ed. by R. Brun, et al., 1999. Vol. 2, 245

5 Fan J, Shen C. Statistical simulation of low speed rarefied gas flows. J. Comp. Phys. 2001. 167, 393

6 Hadjiconstantinou N G, Garcia A L. Statistical error in particle simulations of low Mach number flows. Proceedings Of the First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier, 2001

7 Millikan R A. The general law of fall of a small spherical body through a gas, and its bearing upon the nature of molecular reflection from surfaces. Phys. 1923. 22, 1

作者简介:樊菁 1965年出生。1987年北京大学力学系流体力学专业毕业,1996年8月中国科学院力学所博士。1992年以来,先后在中国科学院力学所、Cornell大学Sibley机械与航天学院、Michigan大学(Ann Arbor)宇航工程系工作。2000年底入选中国科学院"百人计划"。现任中国科学院力学所研究员、博士生导师。主要从事稀薄气体动力学及相关领域研究,在微尺度气体流动、真空薄膜沉积、非平衡现象、高空高速气流等方面有深入工作。

沈青 1935年生。1961年毕业于圣彼得堡大学数力系。中国科学院力学所研究员,博士生导师,中国空气动力学学会副理事长,国际稀薄气体动力学会议咨询委员会成员,第二十届国际稀薄气体动力学会议主席,是国际稀薄气体动力学领域的著名学者。

钱学森物理力学思想与力学所的材料力学性能研究

洪友士

一、钱学森关于物理力学及材料力学性质的学术思想

钱学森在1957年发表的《论技术科学》一文中，明确地把物理力学作为技术科学新的发展方向之一。他指出："这门技术科学的目的是由物质的微结构，原子、分子的性质，通过统计物理的方法来计算物质的宏观性质，这里也包含材料强度的物理理论。这也就是说我们希望用计算的方法来得到工程用的介质和材料的性质。这是一个节省时间、人力和物力的很上算的方法。虽然近代物理和化学的成就是很大的，但是要完全靠它们来推演出物质的宏观性质还是不可能的，在很多地方，我们要采用半理论、半经验的方法来解决问题。这也说明了物理力学的内容和研究方法与统计物理、物理化学、化学物理是有所不同的。物理力学要在这些自然科学的基础上，更进一步地结合实际，求对工程技术有用的结果。"在同文中，钱学森把"固体材料强度及变形问题"列为物理力学的4个研究内容之一。《论技术科学》全文内容极其丰富，同时也是钱学森回国后关于物理力学思想的首次完整表述。此前，他于1953年在"Journal of the American Rocket Society"上发表了题为"Physical Mechanics, A New Field in Engineering Science"的论文，正式提出了物理力学这门新的学科。

钱学森关于物理力学的学术思想可以追溯到20世纪40年代。1948年，他发表了"Engineering and Engineering Sciences"的经典之作。在该文的"应用力学原有范围之外的研究领域"部分里，首先论述了"固态物质"。他指出："当前关于材料的知识是通过大量的实验得到的，这些大量的数据没有得到系统的解释；另一方面，基于量子力学的固体物理理论是纯科学的一个分支。换言之，在实际工程和科学之间存在一条鸿沟，必须在这条鸿沟之间构筑桥梁。用金属的物理理论来构筑桥梁不仅将对实验数据进行系统解释，而且将指明发展新材料的可能性。"显然，他在20世纪50年代对物理力学中的"固体材料强度及变形问题"的阐述是他这方面学术思想的延伸和系统化。

1962年，钱学森编著的《物理力学讲义》正式出版，该书归纳了物理力学的基本概念和研究方法，也介绍了他自己所做的有代表性的工作。该书系统阐明物理力学的目的是要通过对物质的微观分析，把有关物质宏观性质的实验数据加以总结和整理，找出规律，得

到需要的数据，并进一步利用这些规律预见新物质的宏观性质，为发展新材料和新工艺服务。

在1978年全国力学规划会上，钱学森在发言中指出，关于金属材料，还有高分子材料，也要找出物性。它们的分析水平，对金属来说就是晶体颗粒，对高分子材料来说就是分子链，纤维结构。这些东西比单个分子大。国外有一种说法，叫“亚微观”；我们有的同志把它叫作“准微观”。荀清泉同志提议叫“细观”。……我很赞同。……我们把微观范围的叫“物理力学”，那么细观范围是不是可以叫“精细力学”？就是相对宏观研究得仔细一点，到晶体颗粒和高分子团这些结构的水平。我认为‘“精细力学”是大有前途的。新材料、复合材料，以至所谓分子设计，都与它有联系。他接着谈到，当我们弄清了物质结构与物质力学性质的关系，我们就可以把问题倒过来，规定材料的力学性质，问材料的结构、细观结构或微观结构该是怎样的。这可以叫作“分子设计”。现在材料科学已经发展到一旦有了设计，就能把材料造出来。这就又给我们提出一个新的可能：我们可以让工程设计人员、力学工作者和材料科学工作者一道工作，再加上电子计算机，把一项工程设计一直设计到细观或微观的水平……

从20世纪40年代到70年代，钱学森关于物理力学中固体材料强度及变形问题研究的论述体现了如下的学术思想。

(1) 固体材料强度及变形问题是物理力学的一项重要研究内容。物理力学的基本要点是从微观入手，探索和运用微观层次的物性和运动规律并展开分析，从而阐明物质的宏观力学性质。这就对固体材料强度及变形问题的研究给予了明确的定位。

(2) 对于固体材料强度及变形问题的研究，强调宏观与微观相结合，而后又强调微观、细观、宏观相结合。强调实验的重要性，而又指出不能盲目地做实验，应有理论指导；强调分析和计算的重要性，而又指出不能脱离物理背景和工程需求。

(3) 强调在固体材料强度及变形问题研究中的学科交叉，包括力学与物理、化学、材料科学、计算科学等的交叉。同时强调工程技术人员、力学工作者、材料科学工作者等合作研究。

(4) 通过宏、细、微观结合，实验、计算、分析结合，一方面深入揭示固体材料力学性质的物理本质；另一方面根据使用需求从细观结构到微观结构进行材料设计，为发展新材料服务。

(5) 倡导在微观与宏观之间的层次称作“细观”。敏锐地指出“细观”这一层次的特点及其重要性，并预期这一层次的研究将“大有前途”。

钱学森几十年前关于固体材料强度及变形问题研究的这些学术思想是相当前瞻的。这些思想引导了力学所和中国力学界在此领域的科技工作，其中的基本点至今仍是切中时弊或是发展要求的论述。值得回味的是，“细观”这一概念，20多年来已在国内力学界扎

了根，这一范畴的力学也被广泛称作“细观力学”。“细观”和“细观力学”成了国内力学界的共同语言。

二、力学所的材料力学性能研究

全国力学规划会后，力学所很快于1979年组建了材料力学性能研究室，郑哲敏为第一任主任。研究室的继任主任为赵士达和李国琛。材料力学性能研究室成立之初就体现了钱学森关于“固体材料强度及变形问题”的学术思想，强调宏观、细观、微观相结合，实验、计算、分析相结合，力学与材料科学相结合。研究工作主要包括动态(高应变率)材料力学行为和静态材料力学行为研究。科技人员主要来自当时的爆炸力学研究室和固体力学研究室，同时注重从重点高校吸纳有材料科学背景的研究生和大学生进入研究室。研究涉及的材料很广泛，包括金属材料、复合材料、高分子材料、陶瓷材料、岩石材料等。材料细观结构对力学性能的影响是材料力学性能研究室科研工作的主线，包括不同类型材料在不同应变率条件下的变形、损伤、疲劳和断裂。1982年，郑哲敏发表了《连续介质力学与断裂》的论文，针对当时流行的线弹性断裂力学在计及塑性功的分析中忽略了一个长度量纲，从而指出在断裂分析中存在一个被忽视的长度量并提出尺度效应必须包括到断裂理论中。这篇论文的学术观点和内涵是那个时期材料力学性能研究室主导学术思想的体现。为了适应宏、细、微观相结合开展研究工作的要求，从20世纪70年代末到80年代中期，材料力学性能研究室陆续研制和购置了一系列科研工作急需的实验装备，包括轻气炮，Hopkinson压(拉)杆和扭杆，配备环境箱的Instron材料实验机，配备拉伸台的Hitachi S-570扫描电子显微镜，Polyvar-met多功能光学显微镜，Q520图像分析系统等。

材料力学性能研究室成立伊始，就非常注重开展学术活动。一般每周有一次学术讨论会，每次有2~3位科技人员主讲。内容有近期研究进展、近期实验结果、文献调研体会、准备参加国内外学术会议的预讲、参加国内外学术会议的情况介绍等。主讲者都作了认真准备，报告中往往带有提问，报告后的讨论以至争论非常热烈。不论是年长的、中年的还是青年的科技人员隔一段时间都得上台讲一次。通过学术讨论会，大家都很有收获，同时也有效地促进了同事之间的学术交流和对不同工作的了解。主讲者往往收获最大，因为上台报告本身是一种激励，同时在讨论中可以获得多方面的信息从而将有益于他后续的研究工作。这种学术活动的方式是钱学森先生一贯倡导的，他创建力学所的初期，就是以这种方式的学术讨论会来培养和锻炼科技队伍的。

随着科研体制改革和机构调整，1988年力学所组建了非线性连续介质力学开放研究实验室(LNM)，材料力学性能研究室的实验仪器装备和技术人员划入LNM，部分研究人员进入LNM，部分研究人员成为LNM客座人员。经过这一调整，力学所关于材料力学性能的研究逐渐转移到LNM。1993年，材料力学性能研究室并入了新组建的基础力学研究室。

2000年，基础力学研究室与其他基层科研单位一起重组构建了工程科学研究部，而从事材料力学性能研究的队伍作为LNM的客座人员并依托于LNM。实际上，LNM从组建之初就把“固体变形、损伤、破坏的非线性力学性质”作为其3个主要研究方向之一，涉及的范畴包括：固体宏观非线性本构关系；固体微、细观结构与宏观力学行为的关系；变形、损伤、破坏过程中的非线性动力学现象；高温与高应变率条件下的力学行为；表面与界面力学。1999年非线性连续介质力学开放研究实验室升级为国家重点实验室，定名为“非线性力学国家重点实验室(LNM)”。20世纪90年代以来，在材料力学性能研究方面又添置了若干实验装备，包括MTS液压伺服材料实验机、Questar高分辨望远显微镜、超声检测系统、纳米硬度仪、原子力显微镜等。LNM在材料力学性能研究的实验装备在国内有特色并实行集中管理，开放使用，在相应的科研工作中发挥了重要作用。在学术活动和交流方面，除实验室内的讨论外，加强了与所外、院外、国外的交流和合作。这主要体现在：LNM每年在材料力学性能研究方向都安排若干项开放课题；在每年度的学术年会中，“材料力学性能”都是主要交流和讨论的内容之一；经常邀请该领域的知名学者到LNM作学术报告；研究所组织专门的学术研讨会，如1994年8月举办“新材料与材料制备工艺高级研讨会”和1995年7月举办“宏、细、微观力学最新进展及21世纪展望高级研讨会”等。宏、细、微观相结合的材料力学性能研究在LNM得到了坚持和发展。

尽管伴随着科研机构的调整，20多年来，力学所从事材料力学性能研究的这支队伍逐渐形成了特色，体现在：①注重实验，特别是力学实验与材料实验的结合，②注重材料变形、损伤、破坏过程的观察和分析，即注重演化过程研究，③注重材料细观、微观尺度对力学性能的影响，即所谓尺度效应。这些特色体现了钱学森关于物理力学及材料力学性质研究的学术思想。这支队伍从“六五”到“九五”承担了许多科研项目，其中作为主持单位或主要参加单位承担各类重大、重点项目10余项，主要有：国家自然科学基金“八五”重大项目“材料损伤断裂机理与宏微观力学理论”，国家自然科学基金“九五”重大项目“材料的宏微观力学与强韧化设计”，中国科学院“七五”重大项目“材料的变形损伤和断裂行为的机制及其力学理论”，中国科学院“九五”重大项目“非均质材料细观损伤破坏过程、强度理论与强韧化机制”等。

20多年来，这支队伍取得了一批重要的科研成果，其中12项获得国家和中国科学院的科技成果奖。主要获奖成果有：赵士达、沈乐天等人完成的“用于材料动态性能实验的轻气炮”获得了1981年度中国科学院成果奖二等奖。白以龙、郑哲敏等人完成的“热塑剪切带”研究，提出了用于研究热粘塑性变形局部化的模型和基本方程，给出了分析剪切带发展关系的判据，获得了1992年度中国科学院自然科学一等奖和1993年度国家自然科学二等奖。王自强等人提出和建立了裂纹顶端弹塑性高阶渐近场的基本方程，确定了相应的应力应变场数学结构，被称为“开辟了弹塑性裂纹分析的新领域”，获得了1994年度中

国科学院自然科学一等奖和1995年度国家自然科学三等奖。李国琛、洪友士等人完成的"含异相材料的损伤与断裂"揭示了合金材料中两级空洞的交互作用并导出了宏观断裂图,在结构钢的应力腐蚀开裂中引入碳化物影响从而提出新模型,获得了1996年度中国科学院自然科学一等奖。段祝平、周益春等人完成的"长脉冲激光破坏机理的实验与理论研究"发现了长脉冲激光引起的热力耦合反常破坏模式,即所谓"反冲塞"效应,获得了1996年度中国科学院科技进步一等奖。

然而,20多年来,在力学所的材料力学性能研究中,对于预测材料的力学性质,结合工程需求进行材料力学性能分析和材料设计,为发展新材料服务方面还相对薄弱。这仍然应是今后布局和努力实践的方向。

三、结 语

通过回顾钱学森关于物理力学及材料力学性质研究的学术思想和20多年来力学所关于材料力学性能的研究。如下几点是值得总结的。

1. 坚持应用力学的学科方向

宏、细、微观相结合的材料力学性能研究是应用力学的范畴。科研体制可以改革,机构可以调整,但基本的学科方向应予坚持并根据科学前沿和研究手段的发展而使相应的科研内涵不断充实和深入。

2. 坚持力学与其他学科的交叉和融合

物理力学是学科交叉的分支学科,材料力学性能的研究是学科交叉的研究领域。材料力学性能的研究需要力学与材料科学、物理、化学等学科的交叉,需要这些学科科技工作者的协同合作。

3. 坚持开展学术讨论与交流

这既是促进科研工作创新、严谨的一个重要途径,又是培养人才锻炼队伍的有效过程。

以上3点虽然是就钱学森物理力学思想和力学所的材料力学性能研究总结出来的,但其实质与内涵适用于力学所和力学研究的其他方面。

参考文献

1 钱学森. 论技术科学. 科学通报,1957,2(4):97~104

2 Tsien H S. Physical Mechanics, A New Field in Engineering Science. J. of the American Rocket Soc., 1953, 23(1): 14~17

3 Tsien HsueShen. Engineering and Engineering Sciences, C. I. E. Journal, 1948. 550~563

4 钱学森. 物理力学讲义. 北京:科学出版社,1962

5 钱学森. 现代力学——在一九七八年全国力学规划会议上的发言. 力学与实践,1979,1(1):4~9
6 郑哲敏. 连续介质力学与断裂. 力学进展,1982,12(2):133~140

作者简介:洪友士 1951年7月出生。1977年毕业于清华大学机械工程系;1981年在清华大学机械工程系获硕士学位,同年开始在中国科学院力学所工作;1991年在中国科学院力学所获博士学位。研究领域为材料力学性能与内部结构。现任中国科学院力学所所长、研究员、博士生导师;兼任中国力学学会副理事长,“Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures”副主编,《力学学报》、《力学进展》常务编委,“Information”、《固体力学学报》、《机械强度》编委,中国材料研究学会理事。在国内外发表论文90余篇;获中国专利2项;获1996年度中国科学院自然科学一等奖(第二获奖人);获1995年度国家杰出青年科学基金;1998年被评为中国科学院有突出贡献的中青年专家。

超音速燃烧研究[1]

俞 刚 张新宇

一、前 言

超音速燃烧是一种燃料在大于声速的气流速度中进行的燃烧化学反应过程，它是高超声速推进系统——超燃冲压发动机的理论与技术基础。普通空气声速每秒330m左右，超过5倍声速的气流中的动能占总能的80%以上，有必要与普通超音速气流相区别，钱学森在20世纪40年代将其定名为高超声速(Hypersonic)。50年代，钱学森以敏锐的科学眼光觉察到这种新的概念将对未来的航空航天推进技术起重大的推进作用。1960年，在党中央精神的指导下，从国家的全局出发，制定了几项前瞻性的、侧重基础的任务，其中一项就是高超声速冲压发动机，飞行马赫数6，采用超音速燃烧。由吴承康先生负责，准备了实验装置，进行了一段时间的研究，后因为种种原因没有继续下去。20世纪90年代，世界形势变了，中国的经济与科学技术变化更大，在“863”计划与国家自然科学基金委员会航天高科技计划中，高超音速推进技术——超音速燃烧研究得到了支持。我们围绕超音速燃烧和超燃冲压发动机关键技术，建成了直联式超音速燃烧实验室和自由射流超燃冲压发动机实验室，对氢/空气和煤油/空气超音速混合与混合增强、自点火极限规律、维持稳定燃烧、燃烧室构型与性能的关系、碳氢燃料超音速燃烧特性等的试验与理论研究，在超音速燃烧直联式实验技术、超燃冲压发动机自由射流实验技术和非侵入性激光诊断技术研究开发及其在超音速燃烧中的应用等方面获得进展，受到了国际同行的关注，其中利用barbotage雾化煤油增强混合燃烧技术受到了美国空军的重视。8年来共发表论文30余篇，其中国际一类刊物4篇，美国AIAA联合推进会议特邀报告1篇，美国AIAA国际会议15篇，国内核心期刊18篇。下面是我们最近的一项关于液体碳氢燃料超音速燃烧特性的研究成果。

二、引 言

在低高超声速飞行状态下($M<8$)，液体碳氢燃料(比如煤油)是超燃冲压发动机的首

[1] 当前的研究是在中国国家自然科学基金No.19789202的支持下进行的。作者感谢钱大兴和李英在实验准备方面的帮助，李建国研究员、岳连捷博士和陈方博士生在实验和数据处理方面的帮助。

选燃料,原因是它们相对于氢气来说具有能量密度高、操作简便等方面的显著优点。但是,要想真正实现液体碳氢燃料的超燃冲压发动机仍还需要解决许多理论和技术上的问题,特别是液体碳氢燃料着火延迟时间相对较长,超出了气流在燃烧室中的驻留时间这个问题。而且,液体碳氢燃料需要在混合和燃烧之前进行快速气化。因此,超燃冲压发动机获得成功运行所包含的挑战性问题有:液体喷雾的快速气化、有效的混合、着火增强,以及在超音速气流中的燃烧稳定。

相当多的研究(例如参考文献3~16)集中于超音速流动中液体碳氢燃料喷射和有效的火焰稳定技术。研究表明高性能的超燃冲压发动机燃烧室要求:①气流中较高的燃料贯穿深度(为了更好的混合);②产生较小的燃料液滴(为了更快的蒸发);③合适的引导和维持燃烧的火焰稳定机制;④降低伴随在混合和火焰稳定过程中的阻力损失。

许多研究表明氢引导火焰能产生含有大量活性基的高温反应气,碳氢燃料点火性能随之得到了增强。在燃烧稳定方面,超音速燃烧室内运用壁面凹腔作为火焰稳定机制的研究也被很多研究人员所报道。基于凹腔的,包括燃料喷射器和火焰稳定器的一体化燃烧室构型,显示出了在火焰稳定方面的巨大潜力。特别是液体燃料在壁面凹腔的上游或底板喷射可增强混合或缩短点火延迟时间。而且,与在气流中心喷射相比,壁面喷射的实际应用大大地简化了燃烧室和冷却系统的设计。而且,包括我们研究在内的很多研究表明基于凹腔的一体化的构型确实能极大地提高燃烧室的性能。特别是,采用凹腔技术可建立一个作为引导火焰的高温、低速回流区,继而它能减少点火延迟时间并且维持稳定燃烧。

迄今为止,超音速燃烧室中基于凹腔的火焰稳定的物理机制仍然是一个广为关注的问题。比如,在反应流中表征开/闭腔和稳定/不稳定腔的关键参数没有得到很好的研究。特别是当凹腔是开或闭时,它对混合和燃烧的影响是相当迥异的。然而,传统的凹腔特征定义是基于无反应流动的。我们在以前的研究结果建议应该在反应流中修改这个定义。而且 Yu 等的研究侧重于流动诱导凹腔共振现象,系统考察了凹腔流动的稳定和不稳定特性,发现稳定和不稳定的凹腔能分别被用于火焰稳定和混合增强。因而,把多个凹腔串联起来应该是一条有希望的火焰稳定和混合增强的方法。

在碳氢燃料的喷射和混合增强方面,有两个基本要求:①为了更快的蒸发,燃料液滴的尺寸必须尽可能小;②为了更好的混合,超音速气流中的燃料贯穿必须尽可能深。为此提出了气泡雾化(把气泡被加到液体燃料中)的方案。这将导致一个能提高燃料射流喷雾的贯穿深度和气化效果的湍流两相流动。尽管这是一个可行的方案,但它在以液体作为燃料的超音速燃烧中的应用还远远没得到充分研究。Avrashkov 等在一个模型超音速燃烧室中第一次使用了气泡型喷射器来改进煤油射流的雾化和混合。然而,文中没有关于系统考察充气液体燃料射流喷雾结构的报道。最近,Lin 等运用了气泡雾化技术考察了超音

速流中液体燃料喷射的现象。他们的结果表明纯液体模式喷雾的总体破碎过程较慢，因此为了产生较小的液滴需要较长的轴向距离。反之，对于高 barbotage 水平，也就是所谓的 barbotage 模式的喷雾，液体破碎过程很快在液体喷出之后甚至在此之前发生，其原因在于非均相的两相流的高湍流特性和高压 barbotage 气体引起的膨胀。除此以外，随着在 barbotage 模式中 barbotage 气体的数量增加，总体喷雾贯穿高度也增加了。

Mathur 等进一步发展了 Lin 等的工作，他们采用了基于凹腔的燃料喷射和火焰稳定技术和氧气 barbotage 技术，在一个超音速燃烧室中研究了加热的液体燃料 JP－7 的燃烧特性。研究表明 barbotage 气体的充气的效果确实帮助了燃烧，而且在氧气 barbotage 的帮助下，主气流燃烧得以成功维持，甚至包括了火花塞和等离子体火炬的凹腔点火源被关掉之后。

尽管气泡雾化技术能够使液体喷雾产生更深的贯穿和更快的气化而变成一种可行的燃烧增强的途径，但它在液体燃料超音速燃烧中的应用还没有得到广泛的研究。因此，本文发展了我们以前的关于引导喷射和壁面凹腔火焰稳定器的研究，系统地考察了气泡雾化的影响。实验在一个横截面积为 51mm×70mm 的燃烧室里进行，气流的入口马赫数固定为 2.5，采用了各种各样的驻点条件和当量比。具体地说，在有或没有气泡雾化存在的情况下，设计了五种类型的壁面喷射/基于凹腔的一体化构型，并进行了比较测试。高压实验空气的总温为 1 700～1 900K，总压为 1.0～1.1MPa。马赫数为 2.5 的气流中，煤油射流喷雾、贯穿和传播的流场显示研究也在气体 barbotage 存在或不存在的情况下进行。

此外，当前的研究还进一步考察在开腔和闭腔中的气流运动，特别是反应流中的稳定和不稳定凹腔的特性。为了提供火焰稳定和混合增强，两个凹腔，包括一个开腔和一个闭腔被串联起来进行测试。而且，基于在燃烧室内测量到的静压分布，以前开发的一个一维程序被用来估算燃烧室性能和处理数据。

下面就是实验细节，随后是结果和讨论。

三、实验考虑

（一）高温空气供应系统

在加热器中燃烧氢气和氧气获得高温有污染的空气，其产物中氧气含量与正常空气相同。系统由一台计算机控制，最大可以供应流率为 2.0kg/s、总温为 2 100 K、总压为 4.5 MPa 的加热空气。气流随后通过一个二维喷管加速到 2.5 马赫。所有气体流量由音速喷管测量。流量测量的不确定度估计在 3% 以内。总温 T_t 由带有辐射、传导和热惯性修正的 B 型热电偶测量，并且进一步与基于测量到的总压和反应流率的计算值比较。对于 $T_t < 2\ 000$K总温的测量误差在 3% 以内。设备细节可见 Li 等的研究。

(二) 燃烧室构型

图 1 是入口横截面积为 51mm × 70mm 的模型燃烧室示意图。它由四部分组成，分别是 70mm 长的等横截面隔离段,334 mm 长的接近为常面积段的区域(1 度扩张角的边界层修正)(Section Ⅰ),两个膨胀段(Section Ⅱ 和 Section Ⅲ)。第一膨胀段(Section Ⅱ)有 322mm 长和 3 度扩张角，第二膨胀段(Section Ⅲ)有 344mm 长和 4 度扩张角。

为了使构型变化灵活,引导喷射器和火焰稳定凹腔系统设计为可替换、一体化的模块组成。相同的凹腔模块嵌装在燃烧室 Section Ⅰ 或 Section Ⅰ 与 Section Ⅱ 的顶部和底板上。煤油和引导氢气都通过安装在 Section Ⅰ 内的凹腔模块喷射，当第二对凹腔模块被安装在 Section Ⅱ 时,仅仅只有煤油经由这对模块被喷射。根据我们以前的研究结果,选择深度 $h = 12$mm 和长度 $L = 88$mm 的基准凹腔(A)。凹腔(B)、(C)、(D)和(E)与凹腔(A)有相同的 h，凹腔(B)的深度是 16mm。另外，凹腔(B)和(C)是 $L = 88$ mm 的单凹腔构型，而凹腔(D)和(E)具有两个凹腔串联的构型。进一步注意到，凹腔(D)和(E)中两个凹腔的长度为 20mm 和 88mm,基于传统的定义,较短和较长的凹腔分别对应开腔和闭腔。但是，凹腔(D)和(E)中两个腔的放置位置是相反的。对全部 5 个凹腔模块,后斜角固定为 45°。另外，除了凹腔(C)在上游 45°喷射外,煤油在凹腔上游垂直喷射,这与我们以前的实验中煤油大多在凹腔的尾部边缘附近喷射不同。两个煤油喷射器分别安装在燃烧室入口下游 242mm 处和 524mm 处。引导氢气在燃烧室入口下游 283 mm 处喷射,喷射孔一共有 5 个，直径为 1.0 mm,并且与气流方向垂直。凹腔(A) ~ (C)和(D)的引导氢气的喷射点定位在闭腔上游,而凹腔(E) 的引导氢气的喷射点定位在位于前面的开腔的内壁上。

图 2 是液体和 barbotage 气体喷射系统的示意图。5 个直径相同(0.4 ~ 0.8 mm)的并置的喷嘴沿着 70mm 宽的壁面均匀分布，如图 2a 所示。每 barbotage 喷射器由一个直径 1mm 的内管与一个直径 4mm 的外管组成。内管为煤油通道,barbotage 气体在内外管之间的环形空隙中流动。内管顶端和喷嘴之间的距离在 8 ~ 15mm 之间调节。图 2b 也给出煤油和 barbotage 气体的输运系统。煤油存储在容器罐中,通过一个活塞压缩到想要的压力状态。活塞由高压力的氮气驱动,氮气通过气瓶、调压阀、压力传感器和快速开/关高压气体的电磁阀来调节。barbotage 气体(空气或氢气)由高压气罐提供,气体由调节器、电磁阀、压力传感器直径为 0.7 mm 的孔和单行阀门控制。煤油流量等于实际从煤油容器中释放出的煤油质量除以时间。Barbotage 系统的操作顺序由一台计算机通过 4 个电磁阀控制。

(三) 压力测量

静压沿着流动的轴线方向测量。模型燃烧室的每一侧壁上安排了 24 个测压孔。为了获得平均的轴向压力分布，在同样的轴线位置的两个侧壁上测得的压力数据被平均。摩托罗拉 MPX2200 0 ~ 0.5 MPa 压力传感器被用来检测静压信号。压力测量的不确定度

估计在2%以内。

模型燃烧室的出口的总压用水冷 pitot 探针测量。使用的压力传感器是 Sensym 19CIU300 0~1.5MPa 。总压测量的实验误差在3%以内。

(四)气泡雾化的流场显示

气泡雾化的总体喷雾结构的流场显示在静止空气和超音速模型燃烧室中进行。它们在合适的背景光照明下由一台数字影像摄像机记录。图3给出了在没有气体 barbotage 的情况下,煤油喷射到静止空气中的典型喷雾结构。带有直径为0.6mm喷嘴的基准凹腔模块(A)被用来进行测试。对于没有 barbotage 气体的情况,通过对图3a和图3b的比较,说明了喷雾结构的变化与喷射压力有关。特别是在低喷射压力(<1.0MPa)下,雾化很差且远在下游350 mm处才能发生,如图3a所示。当喷射压力被增加到3.65 MPa ,从图3b可见,总体的喷雾宽度增加了,雾化效果大大增强了。从另一方面来说,在给定相同的喷射压力下,图3c和3d显示了充空气和充氢气情况下煤油喷雾的总体结构是相似的。另外,有 barbotage 气体时,煤油射流一旦从相应的喷嘴喷出,很快地膨胀形成钝锥体,钝锥体的直径至少是喷嘴直径的20倍。而且,充气的煤油射流的喷雾结构在喷嘴下游70mm就完全雾化了。上面的结果清楚地表明气体 barbotage 有助于液体的破碎过程并且缩短达到最佳雾化效果所需要的流向距离。

模型燃烧室超音速气流中的喷雾流场显示透过安装在煤油喷射位置两边的观察窗进行记录。一共设计了两种类型的观察窗。第一种由安装在每个侧壁的66mm高、120mm长的石英窗组成。第二种类型各有两扇高46mm、长80mm的石英窗串联起来,安装在燃烧室的两侧。图4给出了在超音速流场中纯液体雾化和气泡雾化的喷雾结构比较。对于这两种情况,煤油以3.8 MPa的喷射压力通过直径为0.6mm的喷射器垂直喷入主气流。当地的静温约为800 K,当地的静压约为0.09MPa。尽管在两种情况中的贯穿深度好像是相似的,其实在纯液体雾化的情况下沿流向方向的总体喷雾长度仅仅是气泡雾化的一半,这一点可以从图4看出。考虑到散射光的强度与液滴尺寸成比例,当前的结果支持了以前的考察结果,即带 barbotage 气体的液体破碎过程更快,以及为了产生较小的液滴及随后发生快速气化所需要的轴向距离更短。

(五)自点火

我们的先前的研究表明当当地温度大于1 280K且液滴的平均直径小于20μm时,煤油的点火延迟期在1ms以下。这样,为了成功地实现自点火,凹腔驻留时间必须比液体燃料气化时间和煤油的点火延迟时间的总和要大。

(六)实验过程

典型的实验使用一个预编程序来控制,实验持续7s。在加热器中,主要实验气体(空

气,氧气和氢气)在引导火焰点燃1s以后进入。一般达到稳定的状态并且达到要求的温度和压力的时间不超过1.5s。一旦稳定的2.5马赫的气流被建立(在2.475s),引导氢气被喷射并且随后在合适状态下自点火。给定的引导氢气和气流需要2s的时间达到稳定燃烧的状态。煤油(有或没有barbotage气体)在4.5s时喷入。一旦引导氢气火焰点燃了煤油,煤油将维持燃烧,甚至在引导氢气停止以后。

(七)数据处理

根据Yu等的研究,用一个已开发的一维模型程序来进行数据处理以及性能估算,一维模型的细节参考文献17。

燃烧效率通常定义为出口和入口之间的静温增加比上相应绝热火焰温度与燃烧室入口静温之间的差。分析中采用$C_{12}H_{24}$作为煤油的简化分子式以及采用一个简化的、一步反应。相关的热容、焓、熵(温度的函数)等热力学性质数据取自文献19中Wang的研究,这些数据用来计算绝热火焰温度。

引导氢气的当量比ϕ_H表示为:

$$\phi_H=(m_H/m_A)/(m_H/m_A)_{st}$$

其中m_H和m_A分别是引导氢气和含水蒸气的空气的摩尔流率。下标st代表化学计量状况,因此$(m_H/m_A)_{st}=0.418$。

煤油的有效当量比表示为

$$\phi_F=m_F/[m_A-m_H/(m_H/m_A)_{st}]/(m_F/m_A)_{st}$$

其中,m_f代表了在把$C_{12}H_{24}$作为煤油的近似分子式情况下煤油的摩尔流率且$(m_f/m_A)_{st}=0.0116$。有效当量比的表达暗示了:完全氧化m_H数量的引导氢气,需要$m_H/(m_H/m_A)_{st}$数量的空气,剩余$[m_A-m_H/(m_H/m_A)_{st}]$的空气,被用来氧化m_f数量的煤油。

四、结果和讨论

(一)火焰稳定器及燃烧稳定

图5给出了相应时刻的典型静压分布。实验使用了仅安装在Section Ⅰ的基准凹腔(A)。2.5马赫气流总温(T_0)1 810K、总压(P_0)1.06MPa。显而易见,不同时刻,即引导火(没有燃烧)之前、引导火之后、在煤油燃烧之后及引导火停止之后沿着燃烧室轴向的压力分布显然是不同的。煤油燃烧达到稳定以后,可以看到模型燃烧室的Section Ⅰ静压分布存在一个近似等压的平台。随后,静压连续地减少直到燃烧室出口为止。凹腔模块的相对位置也作为参考在图中给出。可见,燃料喷射器和火焰稳定器的位置与等压的压力平台的位置符合得相当好,这意味着大部分的热释放在凹腔火焰稳定器内发生。另外,凹腔

模块后的静压快速下降源于下游的两个扩张段和在凹腔火焰稳定器下游热释放的减少。图5也显示出静压图像向煤油喷射点上游延伸。引导氢气喷射在6.1s时停止,煤油继续燃烧0.9s后实验结束(7s)。当引导氢气喷射停止后,静压分布仍然是稳定的,轻微的下降是因为引导氢气释热的消失。

图6进一步说明了凹腔火焰稳定器在燃烧稳定方面的重要影响。实验用了两个安装在Setion I和SectionII上的基准凹腔(A),流动条件 $T_o=1\ 668K$ 和 $p_o=1.015MPa$……。靠前的凹腔安装了煤油和引导氢气的喷射器,靠后的凹腔仅仅装了一个煤油喷射器。从图6可见,存在两个等压平台,它与两个凹腔模块的位置对应得很好。

(二)气泡雾化对燃烧性能的影响

图7给出了使用基准凹腔(A)及空气和氢气作为barbotage气体时煤油的燃烧性能,$\phi_f=0.22$、0.31、0.45,ϕ_H 保持为常数0.09。喷射纯煤油的数据也包括在图7中。在相同的运行条件下,实验结果表明,barbotage气体的充气效果有助于总体燃烧且氢气barbotage比空气barbotage的燃烧性能更好。特别是与使用了纯液体雾化的情况相比,氢气barbotage产生的压力峰值平台要高20%~25%。这证实我们先前的预想:气泡雾化能极大地提高燃料和空气的混合以及快速雾化所必需的细小液滴的生成。氢气barbotage的使用产生了更多的热量来提高总体燃烧。

(三)倾斜喷射对燃烧性能的影响

图8给出了垂直喷射和倾斜喷射情况下的静压分布,亦即对应于凹腔(A)和(C)的情况。流动条件是相同的且 $\phi_f=0.22$, $\phi_H=0.10$。另外,在图8中显示的数据平均三次以保证测量确实是可重复的。由图8可见垂直喷射比倾斜喷射所导致的燃烧性能要好。这个发现与喷雾流场显示的结果是一致的,那是因为垂直喷射产生了更深的燃料贯穿。然而,倾斜喷射可以减小总压损失。我们在下一个小节中将通过评定各种燃料喷射器和火焰稳定器的性能来讨论这个问题。

(四)凹腔的开/闭特性

我们已经认识到,对于凹腔是开的还是闭的来说,它们在混合和燃烧稳定方面起到的效果是相当不同的。例如,流动诱导凹腔共振就在凹腔稳定性方面起了一个重要的作用。一般来说,稳定的凹腔能被用作火焰稳定的目的,不稳定的凹腔能用来帮助混合增强。既然凹腔特性的常规定义是基于无反应流动,而且我们以前的结果也建议这个定义在存在反应的情况下应该做一些修改,我们进行了下列实验以说明这个重要的问题。

图9显示了当使用在上游进行垂直燃料喷射的燃料喷射器和火焰稳定模块的凹腔时,热的超音速流中的纯液体煤油射流的喷雾结构。气流条件 $p_o=0.085MPa$、$T_o=800K$,

不存在煤油自点火的情况。煤油以 4.0MPa 的喷射压力从直径为 0.8mm 的喷射器中射入。而且,凹腔深度和长度分别为 12mm 和 84mm。基于传统的定义,当前 $L/h=7$ 的凹腔是一个开腔。作为一个开腔,从腔体前缘流出的剪切层应该从凹腔上流过,不会撞击腔体底板。然而,图 9 清楚地表明喷雾甚至从凹腔的始端开始就向凹腔的底板偏斜了。因此,当煤油垂直喷射时,$L/h=7$ 的凹腔展现出了闭腔的特性。

图 10 给出了超音速燃烧试验以后的基准凹腔对的照片。此时煤油和引导氢气在凹腔上游喷射。图 10 的相片显示凹腔内的温度分布极其不均匀。特别是回流区的温度较低,因为当地表面的颜色在实验前后几乎没有改变。然而,在靠近尾部斜面附近的当地驻点区域内表面颜色有极大的变化,从而暗示那儿曾有过局部性的高温。这个结果表明了反应喷雾准是撞击在凹腔内的底板上而非尾部斜面墙上,从而诱导了当地的高温区。这个当地的高温区充当了一个热源,这将是点火增强和煤油燃烧火焰稳定的主要因素。既然这个凹腔模块也表现为一个闭腔,那么定义闭腔的深度长度比的阀值在有反应的情况下不会超过 5~7。

(五) 燃烧效率和总压恢复

总温变化范围为 1 700~1 900K,总压保持在 1.0~1.1MPa。对应于图 7 的 9 个实验,采用了 $\phi_f=0.22$ 的氢气气泡雾化,最高的燃烧效率为 89%。而且,最低的 61% 的燃烧效率发生在采用了 $\phi_f=0.44$ 的纯液体雾化情况下。与纯液体雾化的例子相比,采用氢气 barbotage 可以增加燃烧效率 15%~20%。两个对应图 8 的实验比较了垂直喷射和倾斜喷射。发现 45°喷射时的燃烧效率大约比垂直喷射时低 10%。然而,总压恢复加强了。进一步可以看到,在所有考察的条件下,使用一维模型得到的总压恢复的估计值与测量值符合得很好。

五、总　结

本文系统考察了在使用空气或氢气作为 barbotage 气体时的气泡雾化技术以及基于凹腔的火焰稳定技术,在一个横截面积为 51 mm×70 mm 的模型燃烧室内进行了液体煤油的燃烧稳定和着火增强。气流入口马赫数固定在 2.5。实验空气的总压约为 1.05MPa,总温约为 1 700~1 900K。

与纯液体雾化的情况相比,气泡雾化显示出在燃烧增强方面的优点,燃烧效率一般可增加 15%~20%。然而,有一点必须指出,燃烧增强的程度强烈地取决于气泡雾化的运行状况。

一般来说,燃烧性能随着凹腔深度的增加而增加,而凹腔深度实质上表征了凹腔驻留时间。对于给定的凹腔火焰稳定器设计,当凹腔深度在 12mm 基础上增加时燃烧性能变化

不大。

当前的实验结果也证实了我们以前的发现,即存在一个当地的高温区域,它作为热能和活性自由基的来源,提高了煤油燃烧的着火和随后的火焰稳定性能。

在凹腔的特性方面,闭腔深度长度比的定义阀值在反应流中应该不超过5~7。另外,由一个开腔和一个闭腔串联组成的结构显示出了比单个闭凹腔更好的性能,这方面应该得到进一步的研究。

而且,实验结果表明喷射地点和喷射方式对引导氢气当量比的最小需求量有重要的影响。对于引导氢气火焰来说,得到充分发展以便有充足的热和活性基产生,对影响煤油点火具有重要意义。

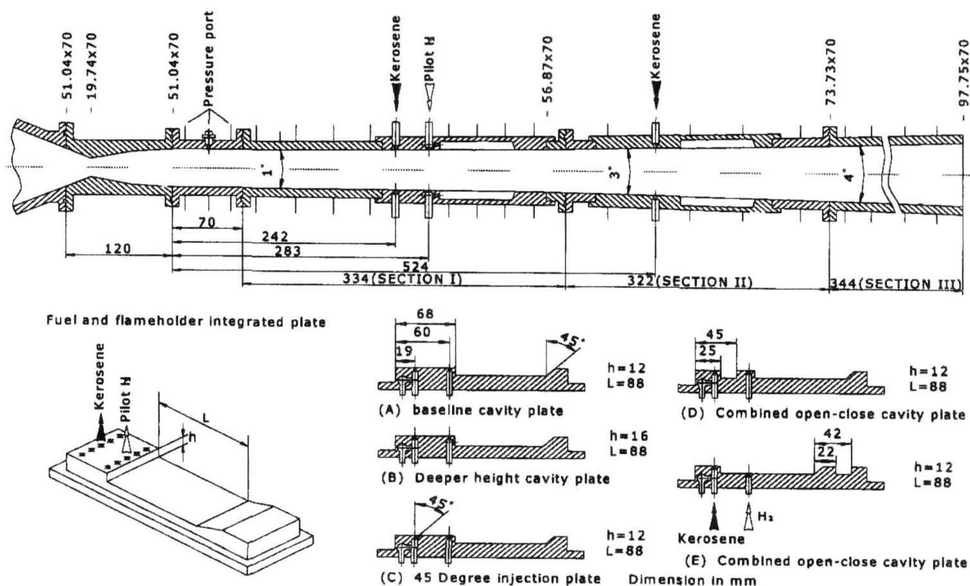


图1 煤油/引导氢超声速燃烧室模型示意图(长度单位:mm)

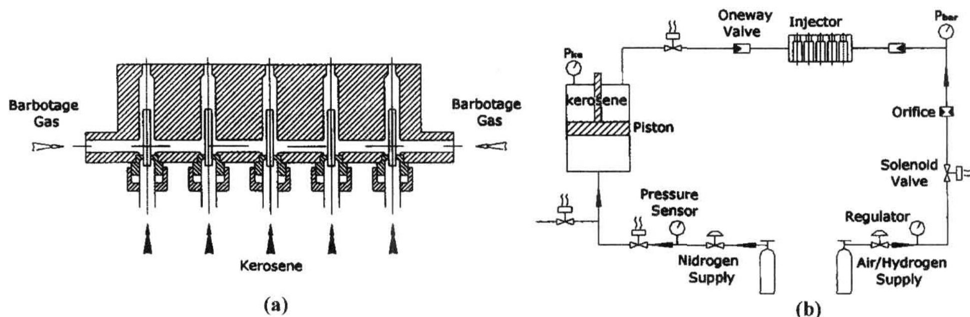


图2 气泡雾化系统示意图

(a) 气泡喷油器;(b) 煤油与气泡气体供应系统


(a)

(b)

图3 煤油在大气中喷射图像
(比较气泡雾化的有无)

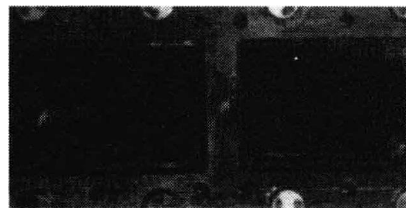

(a)

(b)

图4 高温超声速流中煤油喷射图像
(a) 纯煤油喷射;(b) 气泡喷射

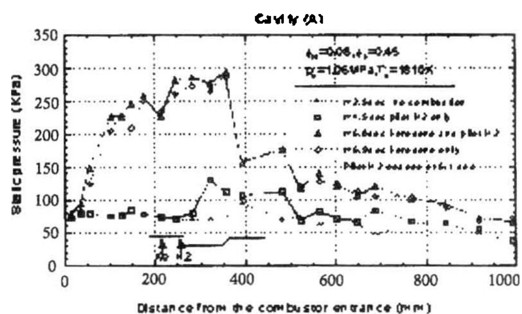


图5 使用基础凹腔(A)时不同时间
沿轴向的静压分布

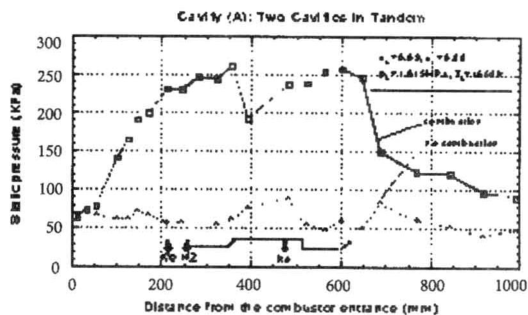


图6 使用串联基础凹腔(A)时不同时间
沿轴向的静压分布

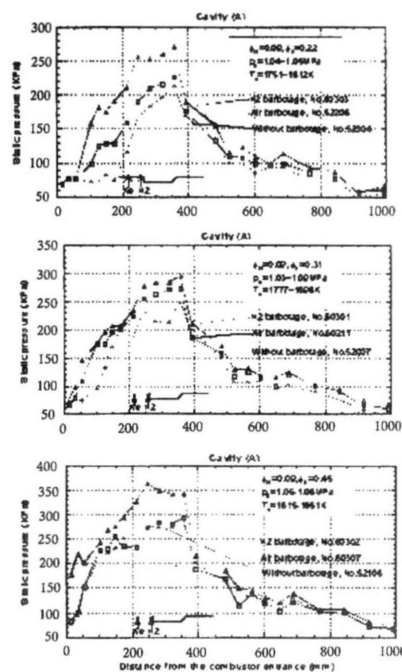


图7 使用凹腔(A)时静压分布
在有无气泡雾化条件下的比较

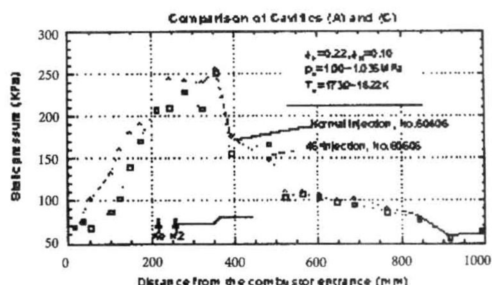


图 8 在垂直喷射与 45 度喷射时静压分布的比较



图 9 在高温超声速气流中煤油喷射的图像

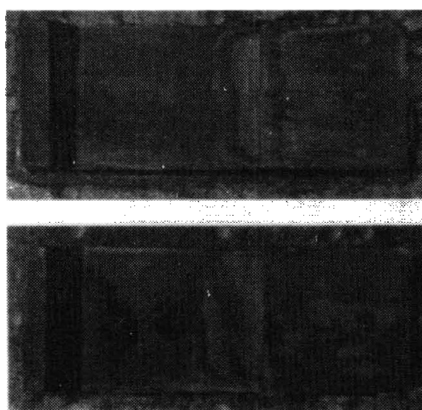


图 10 数次实验后基础凹腔对的照片

参 考 文 献

1 Tishkoff J M, Drummond J P, Edwards T, and Nejad. A S. Future Direction of Supersonic Combustion Research: Air Force/NASA Workshop on Supersonic Combustion. AIAA, 1997.97 ~ 1017

2 Curran E T, and Murthy S N B. Scramjet Propulsion. Progress in Astronautics and Aeronautics, 2001 Volume 189

3 Bonghi L, Dunlap M J, Owens M G, Young C, and Segal C. Hydrogen Piloted Energy for Supersonic Combustion of Liquid Fuels, AIAA, 1995.95 ~ 0730

4 Kay I W, Peschke W T, and Guile R N. Hydrocarbon – Fueled Scramjet Combustor Investigation. *Journal of Propulsion and Power*, 1992. 8(2): 507 ~ 512

5 Vinogradov V, Kobigsky S, and Petrov M, Experimental Investigation of Liquid Hydrocarbon – Hydrogen Fuel Combustion in Channel at Supersonic Velocities, . AIAA, 1992.92 ~ 3429

6 Segal C, Owens M G, Tehranian S, Vinogradov V, Flameholding Configurations for Kerosene Combustion in a Mach 1.8 Airflow. AIAA July 1997(7): 97 ~ 2888

7 Yu K, Wilson K J, Smith R A, and Schadow K C. Experimental Investigation on Dual – Purpose Cavity in Supersonic Reacting Flows. AIAA, 1998.98 ~ 0723

8 Baurle R A, Gruber MR. A Study of Recessed Cavity Flowfields for Supersonic Combustion Applications. AIAA, 1998(1): 98 ~ 0938

9 Hsu K Y, Carter C, Crafton J, Gruber M, Donbar J, Mathur T, Schommer D, and Terry W. Fuel Distribution About a Cavity Flameholder in Supersonic Flow. AIAA,2000(7):2000~3585

10 Burnes R, Parr T P, Wilson K J, and Yu K Investigation of Supersonic Mixing Control Using Cavities: Effect of Fuel Injection Location. AIAA,2000(7):2000~3618

11 Mathir T, Streby G, Gruber M, Jackson K, Donbar J, Donaldson W, Jackson T. Smith C, and Billig F. Supersonic Combustion Experiments with a Cavity-Based Fuel Injector, AIAA,1999(6):99~2102

12 Yu G, Li J G, Chang X Y, Chen L H, and Sung C J. Investigation on Combustion Characteristcs of Kerosene Hydrogen Dual Fuel in a Supersonic Combustor. AIAA,2000(7):2000~3620

13 Avrashkov V, Baranovsky S, and Levin V. Gasdynamic Features of Supersonic Kerosene Combustion in a Model Combustor Chamber. AIAA,1999(10):90~5268

14 Lin K C, Kirkendall K A, Kennedy P J, and Jackson T A. Spray Structures of Aerated Liquid Fuel Jets in Supersonic Cressflows. AIAA,1999(6):99~2374

15 Mathir T, Lin K C, Kennedy P J, Gruber M, Donbar J, Jackson T, and Billig F. Liquid JP-7 Combustion in a Scramjet Combustor. AIAA,2000(7):2000~3581

16 Li J G, Yu G, Zhang X Y, and Huang Q S. Combustion of Kerosene in a Supersonic Stream. AIAA, 2000(1):2000~0615

17 Yu G, Li J G, Zhao J R, Han B, Chang X Y, and Qian D X. Experimental Studies on H_2/Air Model Scramjet Combustor. AIAA, 1999(6):99~2449

18 Li J G, Yu G, Zhang Y, Li Y, and Qian D X. Experimental Studies on Self-Ignition of Hydrogen/Air Supersonic Combustion. *Journal of Propulsion and Power*. 1996.13(4): 538~542

19 Wang T S. Thermo-Kinetics Characterization of Kerosene/RP-1 Combustion. AIAA,1996(7):96~2887

作者简介:俞刚 男,1938年4月出生。中国科学院力学研究所研究员,博士研究生导师。1961年毕业于南开大学数学力学系,1983年~1986年在美国芝加哥Northwestern大学和西雅图Washington大学从事访问研究。1987年任国家"863"计划强激光主题化学激光专家组成员。1990~1992年在美国Princeton大学从事访问研究。1993年~1996年任国家"863"计划航天技术领域吸气式发动机及先进天地往返运输系统专题组副组长。近年从事超燃研究工作。

张新宇 男,1960年2月出生。中国科学院力学研究所研究员,博士研究生导师。1978年考入中国科技大学物理系,1980年作为我国"文化大革命"后的第一批公派留学生前往日本名古屋大学工学部航空学科学习。1984年毕业后,回国在北京航空航天大学任教。1986年返回日本名古屋大学工学部航空学科攻读博士学位。1991年毕业后留校任教。1992年调往日本广岛大学任教。入选1998年度中国科学院百人计划。近年从事超燃研究工作。

钱学森技术科学思想指导清华大学工程力学研究班的创建[1]

清华大学工程力学系

一、钱学森技术科学思想的形成

1934年,钱学森毕业于上海交通大学机械系,同年考上清华大学公费留美。1935年赴美留学,师从著名的冯·卡门教授,攻读航空工程博士学位。1937年,冯·卡门教授曾应邀访问清华大学。他于"七七事变"前夕经由莫斯科安抵北平,7月9日经南京转赴南昌,亲自检查我国的风洞建设。冯·卡门教授在华两周余,曾举行公开演讲两次,后经日本返回美国。钱学森获得学位后,先后任美国加州理工学院的副教授和教授。抗日战争胜利后,清华大学于1946年迁回北京。清华大学在北京重建后所设的航空工程系,由王德荣教授任系主任,并曾聘任钱学森、顾培慕、宁榥、陆士嘉、沈元、屠守锷、丁履德、王宏基等为该系专职教授(钱学森教授因在国外未能应聘到校)。清华大学档案馆至今仍保留着梅贻琦校长当年发给钱学森先生的聘书。

1955年,经中国政府努力,钱学森先生辗转回国。时值中国科学院成立力学研究所,钱学森任所长。钱学森先生回国后,根据科学的性质,提出了"技术科学"这一科学领域的内涵,并在中国结合国情,大力倡导。"技术科学是关于技术的基本理论的科学。以人工自然为研究对象,以技术客体为认识目标,通过技术理论的建立与应用,绘出工程技术客体的有效设计和计算方法,为人类控制和改造自然提供理论。它是介于基础科学和应用科学的中间环节,它既是基础科学的特殊应用,又对应用科学有普遍指导作用"(见《辞海》(缩印本),1999年版,第810页,上海辞书出版社)。《辞海》中对技术科学一词的上述定义,从方方面面映射出钱老对这一问题的阐述。1955年冬,钱学森在北京理工大学做了"谈技术科学"的报告。他在报告中明确指出:应用力学或工程力学应属于技术科学,它应介于基础科学和工程技术之间,它的研究对象应是工程专业中共同性的和具有规律性的问题。

钱学森的上述思想,与力学史上著名的哥廷根学派的治学理念一脉相承。为此,可回顾一下钱学森与哥廷根学派的师承和渊源关系。哥廷根学派的祖师是 A. August Föphl。

[1] 本文由张维、杜庆华、余寿文、章光华、杨卫、殷亚俊、冯西桥集体完成。

Föphl 本人是慕尼黑工业大学的工程力学教授。他不仅把两个儿子培养成为工程力学教授,而且把两个女儿也嫁给了两位工程力学教授。两位女婿中的一位便是后来成为哥廷根学派的领袖人物 Prandtl。Prandtl 是学机械的,他不仅具有丰富的工程知识,而且具有出色的数学才能。但他自认为是一名工程师,而不是数学家。1903 年,年仅 22 岁的 Prandtl 在第三次国际数学家大会上宣读了他的边界层理论。这项工作立即引起了国际知名数学家哥廷根大学数学系系主任 Klein Felix 的注意,他认为 Prandtl 是一个有杰出才华的人,于是将其从汉诺威高等理工学院聘请到哥廷根大学任职。Prandtl 在哥廷根大学主持建立了应用数学力学研究所,并亲自出任研究所的领导人。在 Prandtl 的领导下,哥廷根大学应用数学力学研究所人才辈出,培养出了一大批力学大师。其中有一位便是钱学森的导师冯·卡门。冯·卡门是匈牙利人,早年毕业于布达佩斯高等理工学院机械系。美国的近代应用力学,是在冯·卡门从德国移居美国后才建立起来的。冯·卡门是美国近代应用力学的奠基人,他推动了 20 世纪 30 年代后期美国应用力学的迅猛发展。正是在这个背景下,钱学森来到美国留学,直接师从冯·卡门,自然受到冯·卡门乃至哥廷根学派治学风格的深刻影响。

二、工程力学研究班的诞生

1954 年,国务院开始制订“12 年科学技术远景规划”(以下简称“规划”)。最初只有二三十人参与规划的制订,后来扩大到 300 人,并划分成多个规划小组。1956 年 5 月,“规划”的制订工作顺利完成。该“规划”包含了 56 项,都是与国家工业发展密切相关的项目。周恩来总理看后指出,应增加与基础研究有关的内容。于是,“规划”中增添了第 57 项——天文、地理、生物、数学、物理、化学、力学等学科的发展规划。为推动“规划”的实施,成立了一系列领导小组。其中力学部分,由钱学森任小组组长,郭永怀和张维任副组长。小组紧张工作了一个多月,勾画出了发展力学的详细蓝图。但同时提出了一个紧迫的问题:谁来承担其中的具体工作? 力学小组的专家们深感要发展力学学科,首要任务之一是培养一批人才。

新中国成立前,我国的高等院校都没有力学专业。有些学工程的人到国外学习力学,如钱学森、张维、杜庆华、钱令希等。也有学物理出身的人转学力学,如郭永怀、钱伟长等,造成了新中国成立初从事力学工作的人极少的状况。1952 年院系调整,是否应在清华大学设力学专业曾成为一个有争议的问题。一些力学工作者,如杜庆华、张维、陆士嘉、万家潢、张福范等,认为应该设力学专业。但当时的苏联专家不赞成,因为苏联的力学专业不是设在工科大学,而是设在综合性大学。于是,教育部只在北京大学成立了数学力学系,而在清华大学和其他大学都没有设立。

面临力学人才短缺的困境,以钱学森为首的力学发展领导小组提出了两条建议:①在若干所大学设立力学专业。清华大学于 1958 年成立了力学系。但当年招生,5 年后方能

毕业,缓不济急;②从 1957 ~ 1958 年重点工科院校的毕业生中,挑选优秀者,办力学研究班。

经国务院决定,由高教部与中国科学院在清华大学建立工程力学与自动化两个研究班(工程力学研究班办了三届,自动化研究班办了一届),该研究班由中国科学院力学所和清华大学联合承办,编制隶属清华大学。钱学森教授、郭永怀教授、钱伟长教授、钟士模教授参加建班的最初工作。中国科学院张劲夫副院长大力推动了这一工程科学高品位人才的培育工作。钱学森教授为这两个研究班的第一主持人。钱学森根据在国外发展航空航天工程的特点及经验,深知在航空航天领域培养从事技术科学的人才的重要性,亲自主持创办这两个研究班。力学研究班由钱伟长教授为首任班主任,郭永怀教授和杜庆华教授为副主任。由钱学森同时主持的自动化研究班也是由中国科学院和高教部为贯彻科学规划而合办的,学制一年,班委由钟士模、陆元九、郎世俊等组成。其后由于"反右"运动,钱伟长教授不再主持力学班工作,由郭永怀教授接任力学研究班班主任。郭永怀教授继钱学森、钱伟长后主持力学研究班的工作,他每周一下午自中国科学院力学所至清华大学杜庆华教授家中讨论教学及论文工作。由于郭永怀的党组织关系和日常行政关系隶属于清华大学,故由杜庆华教授抓日常工作。班址选在北京西直门外的中国科学院植物研究所内,与北京动物园毗邻且相通。工程力学研究班分流体力学和固体力学两个专业。自 1957 年 2 月起每年招生约 100 人,学制 2 年。至 1962 年 2 月,力学研究班共办了三届,招收学生 309 人。

力学班的培养目标定位于高层次师资和研究人员。当时虽然没有言明是否给予学位,但事实上是准备按照当时苏联模式培养副博士的。所以要求各单位进行遴选,以利培养。工程力学研究班和自动化研究班培养了从事工程力学与自动化这一技术科学学科领域的研究与教学人才,因此学生的来源乃是选择大学本科将毕业的各工科的优秀学生和从事工程基础研究和教学有一定工作经验的研究人员和教师。生源来自三个方面:①高等院校工科四年级学生;②工厂及企业研发部门的在职科技人员;③在职的高等院校力学教师。毕业后第二、第三方面部分人员回原单位,第一方面部分研究生统一分配到高等院校与科研院所。在听课、读书的基础上,根据当时的实际情况,分别完成"专题研究"和"研究论文"。许多著名教授参加了论文指导。参加指导学员工作的有中国科学院力学所的钱学森教授、郭永怀教授、林同骥教授、李敏华教授,郑哲敏、卞荫贵诸位教授等也参加了指导工作。清华大学的张维教授、夏震寰教授、杨式德教授也进行了论文指导工作。尔后教育部发文正式将这三届培养的研究班学员认同为研究生毕业(虽然当时我国尚未实行学位制度)。

工程力学研究班的学员们得以聆听力学大师们的教诲,钱学森先生亲自讲授"水动力学"和"宇航工程讲座"。他在跨、超音速流动,薄壳屈曲理论,工程控制理论这些分支领域取得了流体力学、固体力学、自动化与控制等学科的开创性成果,在此基础上,深感技术科学的重要性以及在航空、航天领域里基础性工作的重要性,将工程力学研究班与自动化研

究班作为在国内培养技术科学人才的“试点”。钱学森先生的渊博知识和深入浅出的讲解深深地感染了每一个学员。更重要的是,钱学森理论联系实际的治学思想对研究班和学员们产生了深远的影响。钱伟长先生讲授“应用数学”、“工程流体力学”,钱伟长先生、杜庆华教授讲授“弹性理论”,郭永怀教授讲授“流体力学概论”和“边界层理论”,李敏华教授讲授“塑性力学”,郑哲敏讲授“动力学”、“应力和波”,黄克智讲授“蠕变与热应力”,潘良儒讲授“流体动力学”,孙天风讲授“气体动力学”,等等。工程力学研究班的党总支书记先由王和祥担任,后由于王赴前苏联学习,由何友声担任。担任工程力学研究班秘书的有王和祥、徐建国(哈尔滨建工学院教师)、余寿文、郑兆昌等。虽然每届研究班都分为固体和流体两个专业班,但它们有共同的基础课程,并互选对方的专业课程。何友声院士在回忆中写道:“班内的学习风气极好,植物园内书声朗朗,大有‘只读圣贤书,不闻天下事’的味道。早晨锻炼时则通过内院跑进动物园,与狮象虎豹为伍。”

三届工程力学研究班培养的人才经过毕业近40多年的工作考验,证明这一培养制度是成功的。以20世纪90年代中国力学学会第四、五届理事会常务理事的组成人员为例:20多位常务理事中有1/4~1/3的人员曾经是工程力学研究班的学生和教师。他们伴随着历史走过我国工程力学发展四五十年的轨迹,各自在自己的教学、研究岗位上为我国工程力学的人才培养和科学研究做出了贡献。历史证明了钱学森这一具有预见性和战略性的眼光,为我国工程力学事业的发展奠定了坚实的基础。它对力学学科的发展产生了深远的影响,其科学思想深远地影响了中国许多重要大学的工程力学系的建设与人才培养,也催生和抚育了清华大学于1958年正式成立的工程力学数学系。工程力学研究班学员助教中的俞鸿儒、朱伯芳等及学员张涵信、谢友柏等日后均为国内有较为突出贡献的工程力学专家。讲师朱颐龄、阮孟光、张行等在当时力学教学上已颇有成就。而当时的助教学员如唐照千、林钟祥等对推动工程力学研究班亦做出了突出贡献。

三、工程力学研究班体现的钱学森的技术科学教育思想

在工程力学研究班的创建过程中,反映了钱学森的下述思想。

1. 力学必须以工程为本

钱学森在创建清华大学工程力学研究班的主要指导思想是:力学的高级人才要来自工程科学的各个领域。因此,力学研究班的学员全部来自各高校的工科各系、科研部门和厂矿企业,并强调研究内容要结合我国的重大工程问题。钱学森认为:要学好力学和搞好力学,让本科生学习一定的工程课程是很有必要的。力学研究班的学员来自不同的工程专业,正是这一指导思想的具体体现。在工程力学研究班的创办过程中,积累了办学的经验,证明在工程专业本科学习的基础上,再进行工程力学的研究与学习,可以培养出从事工程力学研究与教学的高层次人才。从机械、造船、土木等工程专业选拔生源,这些生源既有坚实的数学、物理、力学的基础知识,又具有这些工程专业的实践训练。既学习过工

程设计的基础理论,又具有相应的工程部门实践训练,这样的生源经过培养,有利于培养既具有坚实的基础理论又有一定的结合工程进行工程力学研究与教学的高层次人才。

2. 力学必须与其他技术科学学科相结合

钱学森先生在创建清华大学工程力学研究班时认为,不能把工程力学研究孤立起来,要与制导、控制相结合。这就是他提议同时成立工程力学和自动化两个研究班,而他愿意作为两个研究班的总负责人的原因。这一思想对工程力学在后来的“两弹一星”研究中起到了重大影响,为我国航空航天事业的发展做出重大成绩起到了推动作用。正是在这一思想指导下,第一届力学班的成员参加了我国第一枚探空火箭的研制工作。

3. 力学教育应以小课为主

钱学森先生建议工程力学的高层次、研究型人才教育应以上小课为主。为从物质条件上贯彻钱学森先生的这一建议,中国科学院当时在位于动物园的动物所和植物所中腾出一部分房子作为力学研究班的授课教室,这为以后高层次、研究型技术科学人才的素质教育提供了一个新的模式。

四、钱学森关注清华大学工程力学系的发展

钱学森在随后的岁月里,对工程力学研究班的延续——清华大学工程力学系的发展仍倾注了心血。以最近十年为例,尽管钱学森已入高龄,且脱离力学多年,但仍然对力学的教育和学科的发展方向十分关注。1991 年 11 月 1 日,工程力学系刘清君等 15 名博士研究生致信钱学森先生,信中提到“我们的成长过程,深受您的影响,如今又在您主持创立的力学系学习,虽然没有机会成为您的学生,但非常希望您能对我们的工作、学习和思想提出建议。您对科学发展的总体看法、对我国科技发展前景的预测、多年来的亲身经历和体会定将使我们受益终身。我们热切期待着您的回音。”钱学森于 1991 年 11 月 14 日回信:

刘清君同志:

您和郭延虎、刘少源、何东明、张明、朱先奎、郑珍平、居时胜、申连喜、徐军、冯西桥、陈夫尧、陈强、陈伟、陈刚 15 位工程力学博士生的来信收到了。您们要我对诸位的工作、学习和思想提出建议,这使我为难:1. 我脱离工程力学工作已 30 年了;2. 对清华大学工程力学系的现状不了解;3. 对您们的具体情况也不知道。但不写回信也不对,下面只讲一个问题,供诸位参考。

我想工程力学系是必须理论联系实际的;一方面是精深的力学理论,另一方面是工程实际急待解决的问题。您们必须以理论去解决实际问题,要得到在生产第一线工作的工程师的欢迎。万万不可只发表论文,不解决问题,让工程师们觉得有你没有你一个样!

怎样做到理论联系实际?必须深入实际。但到了现场,实际就在眼前,你也可能抓不到问题的要害。原因何在?缺少分析洞察问题的能力!怎样培养分析洞察问题的能力?

我认为最好的方法就是学习并掌握马克思主义哲学。

附上几篇我写的文字，供参阅。我只能做到这里，更多的问题我解决不了，诸位请问您们的导师吧。

1997年，时值工程力学研究班和工程力学系建立40周年之际，钱学森先生于9月30日为工程力学系致辞：

工程力学系：

您们9月15日信及建系40周年活动筹委会信都收到。

回忆过去，展望未来，我这个已脱离力学工作多年的人，也想到许多，谨陈述如下，这也算是我对工程力学系建系40周年的祝贺。

在20世纪初，工程设计开始重视理论计算分析，这也是因为新工程技术发展较快，原先主要靠经验的办法跟不上时代了。这就产生了国外所谓应用力学这门学问，它包括流体力学、气动力学、水动力学、弹性力学等，为的是探索新设计、新结构。但当时主要因为计算工具落后，至多只是电动机械式计算器，所以应用力学只能探索发展新途径，具体设计还得靠实验验证。

到了60年代，能进行快速计算的芯片电子计算机已出现，引起了计算能力的一场革命。到现在每秒能进行万亿次浮点的机器已出现。随着力学计算能力的提高，用力学理论解决设计问题成为主要途径，而试验手段成为次要的了。由此展望21世纪，力学加电子计算机将成为工程新设计的主要手段，就连工程型号研制也只用电子计算机加形象显示。都是虚的，不是实的，所以称为“虚拟型号研制”(virtual prototyping)。最后就是实物生产了。

回顾一个世纪，工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段，不是唱配角而是唱主角了。清华大学工程力学系要跟上时代呵！

这是对工程力学系多么深切的期望和鞭策啊！在工程力学系创建40周年后，全系从礼堂区的旧电机馆迁至主楼前区的技术科学楼。在钱老诞辰90周年之际，回顾钱老对清华大学工程力学研究班与工程力学系的教诲，在新世纪的未来岁月里，工程力学将会在钱老的期望中，以技术科学楼为基地，以技术科学为基础，为中华民族的振兴做出应有的贡献。

钱学森教授与近代力学教育

中国科学技术大学工程科学学院
中国科学技术大学力学和机械工程系

1958年钱学森先生参加了以郭沫若院长为首的中国科学技术大学筹备委员会工作，并在科大创立时担任了近代力学系主任❶，为中国科学技术大学，特别是近代力学系的创立与发展做出了重大的贡献，为我国培育了新的一代近代力学工作者，对全国的力学教育产生了重大的影响。

在中国科学院"全院办校，所系结合"的办学方针指引下，近代力学系自建系伊始，在确定培养目标、设置专业、制定教学计划、决定课程设置、聘请教师、"所系结合"实施专业教学(含理论教学和实验教学)、鼓励学生参加科学研究、指导学生毕业论文等各个人才培养环节，无不渗透着钱学森先生的心血。现今回忆起来，这一切充分体现了钱学森的科学世界观及其完整的教育思想，对目前我国的教育，以及正在大力提倡的素质教育，都很有现实意义。

在20世纪40年代，钱学森就预见到，为适应各国发展高新技术的需要，应该大力发展一批应用科学。他将它们统称为"技术科学"(Engineering Science)。1957年他发表了《论技术科学》一文，进一步阐明了技术科学概念的形成。他指出："技术科学是自然科学和工程技术的综合"，"要作综合自然科学和工程技术，要产生有科学依据的工程理论需要另一种专业的人，而这个工作内容本身也成为人们知识的一个新部门：技术科学。"1991年，钱学森在他提出的关于科学技术体系的论述中，就更加明确地指出："自然科学技术部门最高的层次是基础科学(如物理、化学等)；实际应用的是工程技术；在基础科学与工程技术之间的，是技术科学。"从这里，我们感受到钱学森科学世界观的形成、发展过程，值得我们很好地学习和研究。

在钱学森的领导下，近代力学系从成立之日起，就非常明确地提出，要培养技术科学工作者，也即是培养介于科学家和工程师之间的人。按照这样的培养目标，"理工结合"很自然成为近代力学系培养人才的原则。钱学森1957年的一篇论文，在关于"力学及航空"和"技术科学的新方向"，有关力学及与之相关学科论述，就成为中国科学技术大学专业设置的指导思想：高速空气动力学、高温固体力学、化学流体力学和土及岩石力学等专业，设置在近代力学系；物理力学专业设置在化学物理系。钱学森先生还亲自为招生工作撰写

❶见《中国科学技术大学<大事记>1958~1997》，中国科学技术大学档案馆和校长办公室编。

了专业介绍。这些专业的设置,是面向未来的,反映了当代技术科学的发展方向,并是国家急需要发展的学科。当时,这些专业在国内别的学校还未曾设过,或未曾这样设过。高瞻远瞩、面向未来、设置新型专业、培养人才,是钱学森先生一贯的指导思想。例如 1992 年 9 月他在给葛庭燧院士的信中写道:“现在中国科学技术大学有材料设计专业吗?似应设此专业,将来还可以设系。”当力学系根据钱学森的意见,经过调查研究,决定设此专业时,钱先生又分别于 1994 年 6 月和 1996 年 1 月两次写信给力学系予以肯定,称赞“力学系也很称职”。❶

钱学森先生在总结麻省理工学院、哥廷根大学和加州理工学院经验的基础上,形成了他完整的、系统的、深刻的培养和造就技术科学工作者的设想。钱学森先生指出,培养技术科学工作者的课程设置,远比培养一个工程师要求得更加宽而深。也即是说,“从自然科学一直到生产实践,都要懂得”。钱学森认为,那种“前两年着重在自然科学,后两年着重专门业务,但是这两部分没有能结合起来”的培养方法是不足的。强调科学理论和工程技术的综合是“化合物”,不是“混合物”。并且不止一次地指出,培养这样的人,至少需要 6 年的时间,而不是常规工程教育的 4 年。但是他又指出,看这些人掌握知识、能力的程度,不能由所学课程的数量和在校的年限测定;如何有效地应用所学的基本知识和能力,只有通过在应用中取得经验才能得到。他还指出,这个过程在专家的指导下可以加速,因而在完成 6 年的学习之后,还需用 1~2 年的时间,在有经验的高级学者指导下做具体工作。一个准确无误的好方法,就是在一个设备优良的大学中,在权威的指导下研读博士学位。钱学森先生还特别指出学术氛围的作用,认为这是获得智慧最好的途径,智慧可以洞察复杂问题,而这种洞察力是成功解决问题的关键。这些设想是近代力学系的创立、成长和发展的思想基础,并在建设的过程中得到了充分的体现。

中国科学院尊重科学家的意见,决定中国科学技术大学实行 5 年学制,直至 2000 年。近代力学系的教学计划和课程设置,一直遵循了钱学森的思想。简略地说,是要求掌握下列三方面的基本知识和能力:①工程设计的原理和相应实践;②扎实的物理和化学基础知识和相关的技术科学知识及其运用能力;③深厚的数学基础知识及运算、分析能力。因此,在近代力学系的课程设置中,除了要用两年半才能修完的全校必修的公共基础课(如高等数学、普通物理、普通化学,且要求都是甲型的)之外,还设有技术基础课(如机械制图、机械零件、机械原理与机械设计、电工电子学、非电量电测法、计算机原理和应用等)。在三年级下学期,开始学习专业基础课和专业课。最后半年,在专家的指导下完成毕业论文。从课程安排,到课程内容,钱学森先生都有过精辟的阐述。这样的安排,尽管随着新的科学技术的发展,教学内容有了不少的更新和改革,但总体框架一直未变,并坚持到现在。

钱学森先生十分重视基础课教学,为近代力学系聘请了最好的、全国闻名的专家、教

❶钱学森给力学系韩肇元、伍小平教授和伍小平、虞吉林、夏源明教授的两封信现保存在中国科学技术大学力学和机械工程系。

授讲授基础课。如严济慈、钱临照院士讲普通物理，吴文俊院士讲高等数学，蒋丽金院士讲普通化学等。当发现58级学生的数学、力学基础还没达到应有标准时，钱学森立即向学校建议延长半年，决定集中补习数学和经典力学两门课。在亲自向教师交待任务的同时，还建议采用 von Kármán 和 Biot (1940) 著的《工程中的数学方法》作为参考书。随后，近代力学系对59级和60级的学生，也都相应地采取了加强数学和力学基础教学的措施。这里还需特别指出的是，钱学森对数学和计算机的重视由来已久，他认为，"研究技术科学就离不了作为人们论理工具的数学。""作为一个技术科学工作者，除了掌握现有的数学方法以外，还必须经常注意数学方面的发展，要能灵敏地认出对技术科学有用的新数学，快速地加以应用。"钱学森预见到，电子计算机的发展"对技术科学的研究有深切的影响"，并指出"在将来，我们不能想像一个不懂得用电子计算机的技术科学工作者"。回想当年，我国刚刚研制出第一台一地址机的时候，钱学森就在近代力学系的教学计划中，安排学生修习"计算机原理和应用"课程，实在是远见卓识。

钱学森先生当年对教学的重视，今人难以望其项背。他几乎动员了全力学所的专家，进行专业基础课和专业课的教学，如郭永怀、吴仲华、林同骥、郑哲敏、李敏华、卞荫贵、吴承康、黄茂光、胡海昌、钟万勰、潘良儒等，难以穷举(他们中的大多数是院士或后来当选为院士)。在教材方面，当时除了有些前苏联的教科书以外，专业基础课和专业课均无现成的教材，所用教材都是由这些讲课的专家自己新编的。不仅如此，钱学森先生在肩负重任的情况下，还亲自为近代力学系的两个年级讲授"星际航行概论"[1]。他的教案，经整理由科学出版社出版发行后，还赠送给每个听课学生一本。这以后，他还为化学物理系学生讲授了"物理力学"。钱学森先生在"星际航行概论"序言中指明，这本书的"主要对象是近代力学工作者"，说明了他讲授这门课程，试图达到两个目的："第一，想说明实现星际航行的各个技术问题，从而一方面使投入到这些单个问题作研究的科学技术工作者能了解每一个问题在全部工作中的意义；而另一方面也是要说明星际航行技术的高度综合性，它几乎包括了所有的现代科学技术的最新成就，像近代力学、原子能、特种材料、高能燃料、无线电电子学、计算技术、自动控制理论、精密机械、太空医学等。星际航行的更进一步发展不但对上述这些科学技术提出新的、更高的要求，而且还会对另外一些直到现在还未发生联系的学科，像植物学、动物学、生物物理、生态学、遗传学、地质学等提出研究课题，使这些学科也得到以前未有的推动力，并向新的方向发展。一句话，星际航行是组织和促进现代科学技术的力量；星际航行可以广泛地带动各门科学前进。""第二点是想说明星际航行实践的复杂性和艰巨性。星际航行事业的每一个部门，研究、设计、试验、制造、发射、通讯都需要一个庞大的组织，都需要一个千万名科学家、设计师、工程师、技师、技术员、工人和其他人组成的队伍。这些部门进行工作所需要的设备在质上要求最高的，在量上也多；因此没有一个强大和各方面成套的工业，没有一支多种学科和人数众多的科学技术队伍，就不

[1] 当时的课程名为"火箭技术导论"。

可能设想全面地开展星际航行的工作。自然,星际航行技术并不神秘,分析起来也不过是一般自然规律的具体应用,星际航行技术的基础也还是众所周知的基础学科数学、物理、化学等。我们要强调的是:虽不神秘,但也不简单;星际航行是整个现代科学技术最高水平的集中表现,不是轻而易举的。”钱学森先生的讲课是这两个年级学生难以忘怀的享受,通过对现代科学技术的需求和发展的了解,使学生树立起正确的科学世界观和合作精神。

钱学森先生非常重视对学生创新精神和创造能力的培养,他曾经指出:“一个技术科学工作者的知识面必然是很广阔的,不仅知识广,而且他还必须要能够灵活地把理论和实际结合起来,创造出有科学根据的工程理论。”“要把自然科学的理论应用到工程技术上去,是一个非常困难、需要有高度创造性的工作。”因此,他满腔热情地支持学生的课余科研活动,像58级的人工降雨火箭的研制,59级的冲压式发动机的研制等,都是当年钱学森先生提出的题目。这些活动有效地培养了学生敢于创新的精神,锻炼了学生的动手能力(白以龙院士就是当年火箭研究小组的成员)。为了使学生尽早地受到科学研究的熏陶,学生在校本部学习两年半以后就迁至到中关村,在所里进行专业基础课和专业课的教学,并能经常听到所内外和国内外专家的学术报告,有的同学还在所里的专家指导下参加早期的研究活动。毕业论文作为培养学生创新精神和创造能力的重要环节,钱学森非常重视,精心做了组织安排,动员力学所有关研究室的专家进行指导,并亲自参加学生的论文答辩活动。1963年3月30日,钱学森先生还应学校的邀请,为全校58级学生做了如何撰写毕业论文的报告。在报告中他讲了两个问题:一是介绍我国科学技术现代化的总要求,并谈他个人的体会,从而鼓励学生要有远大的志向,要不怕苦,不怕累,发愤图强,雄心勃勃去攀登科学高峰。二是讲如何做好毕业论文,指明做毕业论文的目的是练兵,并提出了应该以严肃、严密、严格的三严作风来对待论文。如果论文是几个人合作,就应该有所分工,但更重要的是几个人协作,要同心协力,并强调如不养成和别人合作的良好作风,将来在科学工作中是要吃亏的。在科学道路上要有股傻劲,不要怕做小的工作,需要付出大量的平凡劳动。钱学森的这些谆谆教导在学生中产生了深远的影响。

钱学森先生以极大的热忱关心中国科学技术大学和近代力学系的成长和发展,并见诸行动。他在百忙中时常到校,召开任课教师座谈会研究教学,召开学生座谈会听取学生意见,指导学生课外科研活动,并赠款给学校改善设备等等。

钱学森所作的这一切,为近代力学系奠定了良好的基础,特别是他的科学世界观、方法论和教育思想,对在近代力学系工作的教师、学习的学生均产生了难以忘怀的、不可磨灭的影响。当然他所作的一切,不仅仅是对近代力学系,而且对中国科学技术大学,能在成立不久的时间内形成自己的特色,并进入全国的名校之列,有着重大的影响;同时,也对全国的教育,特别是力学教育发生了重大影响。

自1963年起,近代力学系每年都有一批毕业生分配到力学所、国防科工委的所属单位(有的是研究所,有的是工厂)和高等学校工作。无论是在研究单位从事基础研究、应用研究工作,还是在工厂从事工程技术工作,他们都能很快适应,有后劲,受到了用人单位的好

评。他们中的多数人,已成为这些单位的骨干、学科(业务)带头人;近代力学系前三届毕业生中,已有五位杰出者脱颖而出,当选为中国科学院院士或中国工程院院士。从他们的表现可以看到,近代力学系培养人才的特色,这在中国科学技术大学各系之间互相比较也是十分突出的。

非常可惜的是,中国科学技术大学正在蓬勃发展的势头,因“文化大革命”不得不停顿下来。到“文化大革命”后期,这个学校又遭受下迁的重大破坏,使科大的成长道路极为曲折。粉碎“四人帮”之后,党中央拨乱反正,迎来了科学的春天。经过全校师生员工艰苦卓绝的努力,修复了创伤,科大又以当年形成的办学特色重新崛起。应该说,近代力学系——这一当年由钱学森先生和他的同事们开创的事业,也随着科大的新生得到了继承和更大的发展。以钱学森先生为代表的治学精神和学识,一直影响着近代力学系的建设和发展,并惠及代代师生。至今,近代力学系仍以培养技术科学工作者为本系的主要培养目标,以“理工结合”为特色,坚持重基础,重创新,重素质(重做人)的知识、能力、素质三位一体的培养原则。教学与科研相结合,“理实交融”[1] 地培养人才。近代力学系现已成为“国家基础科学和教学人才培养基地”;随着我国本科—硕士—博士教育体制的完善,近代力学系也得到很大的发展,并已成为国家力学一级学科学位授予点和“中国科学院博士生重点培养基地”,设有流体力学、固体力学和工程力学3个博士点;还设有国家人事部的“力学学科博士后流动站”。

21世纪初,郑哲敏先生又著文《关于技术科学与技术科学思想的几点思考》,强调了“在我国实行科教兴国和可持续发展战略时,需要进一步加深对技术科学的认识,以期能在较短的时期内在关键领域里赶超国际先进水平”。今天我们共同来回顾并研讨钱学森先生的技术科学思想并展望未来,这对我国的技术科学,特别是力学及其相关学科的未来发展有着深远的现实意义。2000年,国家自然科学基金委数理科学部公布了力学学科《学科发展与优先领域战略研究报告》。报告中对力学学科的地位与作用,力学学科发展的特点、趋势与前沿,都作了详细的阐述,并提出了2015年之前力学学科的发展战略目标,这对未来的科学研究工作,很有指导意义。显然,我们要想达到这样的目标,需要高水平的人才,特别是还需要解决人才断层问题。今天我们回顾钱学森先生的治学精神与教育思想,就是要像钱学森当年那样,不仅是对技术科学及其发展趋势要有真知灼见,还要重视并提出设想与办法,培养能胜任这些艰巨工作的人才,以满足国家的需要,在关键领域里赶超国际先进水平。为此,就需要深化教育改革,需要更好地规划和完善目前正在实行的本科—硕士—博士各个教育阶段相应的教育内容与环节,并予以实施。这是一项系统工程,自然是学校责无旁贷的任务,但是也希望能得到研究单位和工程技术部门的支持与合作,只有大家携起手来培养人才,才能适应具有“复杂性和艰巨性”的重大技术科学领域的需要。

[1] 见中国科学技术大学校歌,郭沫若词,吕骥曲。

参考文献

1 Tsien H S. Engineering and engineering science. *CIE Journal*, 1948, 550 ~ 563

2 钱学森. 论技术科学. 科学通报, 1957(2): 97 ~ 104

3 钱学森. 我们要用现代科学技术建设有中国特色的社会主义. 见:九十年代科技发展与中国现代化系列讲座. 长沙:湖南科学技术出版社, 1991

4 钱学森. 星际航行概论. 北京:科学出版社, 1963

5 国家自然科学基金委数理科学部. 学科发展与优先领域战略研究报告. 北京:气象出版社, 2000

钱学森对系统科学和系统工程的贡献

于景元 涂元季

2001年12月11日是钱学森同志九十寿辰。

在钱老辉煌的科学生涯中,他的研究领域有应用力学、喷气推进与航天技术、工程控制论、物理力学、系统工程、系统科学、思维科学、人体科学、科学技术体系与马克思主义哲学等,跨越了工程技术、技术科学、基础科学直到哲学四个层次。他不仅在这些领域中建树了许多丰碑,而且充分体现了他的理论与实践紧密结合、科学技术与马克思主义哲学紧密结合的研究特色与学术风格。他所取得的成就充分表明:"钱学森是一位杰出的科学家、思想家,他把科学理论与火热的改造客观世界的革命精神结合起来。一方面是精深的理论,一方面是火热的斗争,是'冷'与'热'的结合,是理论与实践的结合。这里没有胆小鬼的藏身处,也没有自私者的藏身地,这里需要的是真才实学和献身精神。"钱学森的科学精神、科学思想、科学方法是中华民族宝贵的精神财富,永远值得我们学习。

在钱老丰富的科学历程中,有一个非常突出的明显特点,那就是他的系统思维和系统思想。20世纪70年代末以来的20多年时间,是钱学森系统思维、系统思想非常活跃的时期。他一方面面向社会实践的应用,另一方面追求理论与方法的创新,他的系统思想、系统方法、系统理论与系统应用,都有了新的发展,进入了新的阶级,达到了新的高度。

钱学森的系统思想,首先表现在他提出了一个清晰的现代科学技术体系结构;同时又进一步建立了系统科学体系结构,即系统科学如同自然科学、社会科学等一样,是现代科学技术体系中的一个科学技术部门。它也有三个层次的知识结构:处在工程技术层次上的是系统工程,这是直接用来改造客观世界的学问;处在技术科学层次上的有运筹学、控制论、信息论等,这是直接为系统工程提供理论方法的;而处在基础科学层次上的便是系统学。这是一门尚待建立的新兴学科,它是钱老在1979年首先提出来的。

钱老在美国创建了工程控制论,回国后又大力推动运筹学的研究。如果说这是他早期对系统理论贡献的话,那么创建系统学则是他对系统理论的新贡献。与此同时,在系统应用方面,他又将系统工程推进到复杂巨系统工程。这两方面的成就都是具有里程碑意义的工作。本文的目的,就是介绍上述两个方面钱老所做出的贡献。

一、创建系统学

为了建立系统学,钱学森采取了讨论班的方式。他亲自倡议和指导了"系统学讨论班"的学术活动。在讨论班上,就与系统学有关的学科理论,如动力系统理论、混沌理论、

现代控制理论、耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变论、模糊数学、人工智能、知识工程、中医学、西医学、分子生物学、脑科学、思维科学、数量经济学、定量社会学、生态学、地理科学、作战模拟、军事科学等的新进展,以及来自实践的成功研究案例,进行学术报告和讨论,充分发扬学术民主。在这个讨论班上,钱老发表了很多重要学术思想,提炼了许多重要科学概念,提出了综合集成方法论。在这些进展的基础上,钱老明确界定系统学是研究系统结构与功能(演化、协同与控制)一般规律的科学。

系统分类是系统学中的一个基本问题。已有的系统分类主要依据系统的内涵,其缺点是失去了对系统本质的刻画。钱老根据系统的结构及其复杂程度,提出了新的系统分类。这里,一个是子系统的数量和种类,另一个是子系统之间关联关系的复杂程度和系统的层次结构。从这个角度出发,将系统分为简单系统、简单巨系统、复杂巨系统。例如生物系统、人体系统、人脑系统、地理系统、社会系统、星系系统等都是复杂巨系统。其中社会系统因有人作为子系统参与其中,而人又是有思维的,是最复杂的巨系统了,所以又称作特殊复杂巨系统。这些系统又都是开放的,与外界有物质、能量和信息的交换,故称作开放的复杂巨系统。

钱老的系统分类具有极为重要的理论和实践意义。近10多年来,复杂性研究引起了国内外一些专家、学者的重视,但至今不同学科的专家、学者对复杂性的认识还不一致。在1999年出版的美国《科学》杂志上,有一组文章讨论复杂性问题,采用了"复杂系统"一词作为标题,"以代表那些对组成部分的理解不能解释其全部性质的系统之一"。这说明他们也意识到要把复杂性研究和系统概念结合起来。但在复杂性问题上,钱老和外国科学家不同,他不是从复杂性抽象定义出发,而是从实际出发,从方法论角度来区分复杂性和简单性。如果仅从概念出发,不仅难以统一认识,甚至抓不住事物本质而把复杂性简单化,或把简单性复杂化了。在国外,有人把一个层次的问题如混沌,即使混沌中比较复杂的问题,像无穷维的 Navier – Stokts 方程所决定的湍流、自旋玻璃等,都叫复杂性问题。但钱老认为,这还是属于有路可循的简单性问题。正是从方法论出发,钱老在80年代就明确指出"凡现在不能用还原论方法处理的或不宜用还原论方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题"。他还进一步指出,国外的复杂性研究实际上是开放的复杂巨系统的动力学问题。这样,就从系统学角度给出了复杂性的一个清晰和具体的描述。

上述的系统分类还意味着有不同的研究方法。从方法论来看,对简单系统、简单巨系统都已有了相应的研究方法和方法论,也有了相应的理论并在继续发展之中。但对于开放的复杂巨系统(包括社会系统),不是还原论方法或已有的其他方法所能处理的,需要有新的方法和方法论。从这个意义说,它确实是一个科学新领域。

还原论方法在自然科学领域中取得了巨大成功。但还原论的不足之处正日益明显。比较早意识到这一点的科学家是冯·贝塔朗菲(L. von Bertalonffy)。他是一位理论生物学家,当生物学研究已深入到分子层次时,用他本人的话来说,他对生物整体的认识反而模糊了,于是他转向了整体论,提出了一般系统论。一般系统论对系统科学的产生和发展作

出了重要贡献,但限于当时的科学技术水平,他没能解决整体论方法的具体问题。

钱学森是一位自觉应用马克思主义哲学指导自己研究工作的科学家。他在吸收国外现代科学技术进展的同时,又能不受他们理论方法的局限,站得比外国科学家更高一些。他在实践论的指导下,不断总结、提炼一些成功的实践经验。80年代初,针对军事对阵系统和现代作战模拟的研究,他曾提出处理复杂行为系统的定量方法学是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种方法还是半经验半理论的。后来在“系统学讨论班”上,他又继续方法论的探索。这时他特别注意到社会系统、地理系统、人体系统中一些成功的研究,为新方法的形成奠定了实践基础。

尤其需要强调的是,对当前这场以计算机、网络、通信为核心的信息技术革命,钱老不仅指出了它将导致一场新的产业革命,而且对人类自身,特别对人的思维也会产生重要影响,将出现人机结合的思维方式,人将变得更加聪明,从而推动了思维科学的发展,也为研究方法的发展开辟了新的途径。

20世纪80年代末,钱老提出了“从定性到定量综合集成方法”以及它的进一步发展:“从定性到定量综合集成研讨厅体系”(以上简称综合集成方法论),并把运用这套方法的集体称为总体设计部。

综合集成方法的实质是把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系有机结合起来,构成一个高度智能化的人机结合、人与网络结合的体系。它的成功应用就在于发挥这个体系的综合优势、智能优势和整体优势。它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息统统集成起来,从多方面的定性认识上升到定量认识。

在应用这个方法时,也需要系统分解,在分解后研究的基础上再综合集成到整体,实现$1+1>2$的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的。综合集成方法吸收了还原论方法和整体论方法的长处,同时也弥补了各自的局限性,它采取了自上而下,同时又自下而上的研究途径,是还原论方法和整体论方法的结合,既超越了还原论方法,又发展了整体论方法。综合集成方法论的理论基础是思维科学,方法基础是系统科学与数学科学,技术基础是以计算机为中心的现代信息技术,实践基础是复杂系统工程的实际应用案例,哲学基础是马克思主义哲学的实践论和认识论。

国外的复杂性研究,在具体研究方法上确有一些创新,如遗传算法、Swarm平台、以Agent为基础的系统建模等,但在方法论上,虽然也认识到还原论方法处理不了复杂性问题,但并没有开辟出新的途径,因而曾感到困惑。而钱老的综合集成方法论则是方法论上的创新,这也是钱老比他们高明之处。

钱老指出,开放的复杂巨系统研究,目前还没有形成从微观到宏观的理论,也没有从子系统相互作用构筑起来的统计力学。但有了研究方法和方法论,就可以逐步建立其理论。他还进一步指出,要建立开放的复杂巨系统一般理论,必须从具体的复杂巨系统研究入手。只有这样,研究成果多了,才能从中提炼出一般性理论。

综合以上所述,钱老提出了以简单系统、简单巨系统、复杂巨系统和社会系统为主线

的系统学提纲和内容，这就形成了系统学的基本框架。由许国志院士主编的《系统科学》一书，其系统理论部分，就是按照这一框架编写的。

钱学森认为，系统学的建立是一次科学革命，它的重要性并不亚于相对论和量子力学。从现代科学技术发展来看，如果说量子力学是微观层次上(典型尺度约为 10^{-15}cm)研究的科学革命，相对论是宇观层次上(典型尺度约为 10^{21}m)研究的科学革命，那么系统学则是宏观层次上(典型尺度约为 10^{2}m)研究的科学革命。宏观层次就是我们人类生活的这个客观世界。在这个层次上出现了生命和生物，产生了人类和人类社会。复杂巨系统和复杂性研究，主要都集中在这个层次上。

二、开创复杂巨系统工程

钱学森在系统理论上的成就，是以他长期的系统工程实践为基础的。在开创和发展我国导弹和航天事业的过程中，钱老不仅成功地运用了工程系统工程，而且又提炼成一般系统工程。1978 年，他和许国志、王寿云在《文汇报》上发表的《组织管理的技术——系统工程》一文就明确指出："系统工程是组织管理系统的技术，是对所有系统都适用的技术"。这篇文章对系统工程在我国的推广和应用，起到了很大作用。从那以后，系统工程的应用范围越来越广泛，所处理的系统也越来越复杂。但是，对于社会系统、地理系统等这类复杂巨系统，不是一般系统工程所能处理的，就连运筹学、控制论、信息论等这些技术科学所提供的理论方法也不够用了。在大力推动系统工程应用的同时，钱老一直高度重视系统工程方法的探索和研究。随着系统学的进展，特别是综合集成方法论的提出，为复杂巨系统的组织管理提供了有效的科学方法，这就开创了复杂巨系统工程，特别是社会系统工程，这是钱老对系统工程的又一重大贡献。

钱老非常重视社会系统的研究，他根据社会形态的概念，从整体上研究社会主义建设的组织管理问题，首先提出了社会主义建设的体系结构。社会形态是马克思提出来的。钱老把社会形态和社会系统结构结合起来，认为尽管社会系统很复杂，"但从宏观角度看，这样复杂的社会系统，其形态，即社会形态最基本的侧面有三个，这就是经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态。"社会形态的这三个侧面是相互联系、相互影响、相互作用的，从而构成一个社会的有机整体，形成了社会系统结构。

从社会发展和文明建设的角度来看，相应于社会形态的三个侧面，也有三种文明建设，这就是相应于经济的社会形态的经济建设，即物质文明建设；相应于政治的社会形态的政治建设，即政治文明建设；相应于意识的社会形态的思想文化建设，即精神文明建设。结合我国实际情况，钱老提出了我国社会主义文明建设的系统结构：①社会主义物质文明建设，包括科技经济建设、人民体质建设；②社会主义政治文明建设(文件中通常称作民主与法制建设)，包括民主建设、法制建设、政体建设；③社会主义精神文明建设，包括思想建设、文化建设；④地理建设，包括基础设施建设、环境保护和生态建设。综合起来共四大领

域九个方面，在这九个方面中，科技经济建设是中心，这也符合邓小平同志提出的以经济建设为中心和科学技术是第一生产力的思想。

由于社会形态三个侧面的相互关系，也就决定了社会主义三个文明建设之间是相互联系、相互影响、相互作用的。一个社会与其所处地理环境密切相关，社会系统的环境就是地理系统，社会系统和地理系统之间也是相互联系、相互影响、相互作用的。从系统学观点来看，只有当社会系统内部之间以及与其环境相互协调时，才能获得最好的整体功能。这就是说，社会主义三个文明建设以及地理建设，必须协调发展，形成良性循环，才能使我国社会主义建设速度更快、效率更高、效益更好。反之，如不协调，那么社会主义建设事业就会受到影响，甚至造成巨大损失。在我国社会主义建设过程中，已有大量事实证明了这一点。

四大领域的建设是变革和建设社会与环境并使它们之间协调发展的伟大实践，这是一项极为复杂的大规模工程，既然是工程，是改造客观世界的工程，那就不仅需要理论，而且还需要技术。钱老指出："我们可以把完成上述组织管理社会主义建设的技术叫作社会工程，它是系统工程范围的技术，但范围和复杂程度是一般系统工程所没有的，这不只是大系统而是巨系统，是包括整个社会的系统"。这里所说的社会工程就是社会系统工程。社会系统工程是组织管理社会系统，以使四大领域协调发展并获得长期和最好的整体效益的工程技术。它所用的方法就是综合集成方法和总体设计部。

我国的改革开放和社会主义现代化建设，迫切需要社会系统工程，它对决策科学化、民主化和组织管理现代化具有重要意义。这也就是为什么钱老一直大力推动系统工程的应用和建议设立总体设计部的根本原因。他的这些建议受到党和政府的高度重视和充分肯定。

钱学森是我国系统工程和系统科学事业的开拓者和奠基者。他在这一领域中所取得的成就，是钱学森科学精神、科学思想、科学方法的重要组成部分。而在这个领域的开创过程中，他所表现出来的勤奋的治学精神、严谨的治学态度、求实的治学作风，永远是我们学习的光辉榜样。

参考文献

1　王寿云，等．中国现代科学家传记钱学森．北京：科学出版社，1991

2　钱学森．现代科学技术的特点和体系结构．论系统工程．长沙：湖南科学技术出版社，1988

3　钱学森．大力发展系统工程尽早建立系统科学体系．光明日报．1979－11－10

4　钱学森，于景元，戴汝为．一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论．自然杂志．1990（1）

5　Gallagher R，Appenzeller T. 超越还原论．见：戴汝为主编．复杂性研究论文．1999

6　王寿云，等．开放的复杂巨系统．杭州：浙江科学技术出版社，1996

7　Horgan J. 复杂性研究的发展趋势——从复杂性到困惑．科学美国人，1995(10)

8 许国志主编．系统科学．上海:上海科技教育出版社,2000
9 钱学森,许国志,王寿云．组织管理的技术——系统工程．文汇报,1979-9-27
10 钱学森,涂元季．我国社会主义建设的系统结构．人民论坛,1992(6)
11 钱学森．社会主义文明的协调发展需要社会主义政治文明建设．中共中央党校报告选(1~11),1989
12 钱学森,乌家培．组织管理社会主义建设的技术——社会工程．论系统工程．长沙:湖南科学技术出版社,1988年
13 钱学森．我们要用现代科学技术建设有中国特色的社会主义．九十年代科技发展与中国现代化系列讲座．长沙:湖南科学技术出版社,1992

作者简介:于景元　1937年出生。现为中国航天科技集团公司710所研究员、科技委主任、中国系统工程学会副理事长、国务院学位委员会系统科学评审组成员。

涂元季　1939年出生。现为中国人民解放军总装备部高级工程师,钱学森的助手。

钱学森与中国航天系统工程

中国运载火箭技术研究院

1956年,党中央、毛主席洞察国际风云变幻,做出了发展我国导弹事业的英明决策。同年10月,新中国第一个导弹研究机构——国防部第五研究院宣告成立,钱学森担任院长。1957年11月,国防部第五研究院一分院(即今天的中国运载火箭技术研究院)成立,钱学森兼任院长。钱学森以他在总体、动力、制导、气动力、结构、计算机、质量控制等领域的丰富知识,为组织领导新中国导弹、火箭和航天器的研究发展工作发挥了巨大的作用,而在学术上的最大贡献则是创建发展了航天系统工程。在钱老九十周岁寿辰之际,回顾总结他的科学贡献及学术思想,对中国航天事业在新世纪的持续发展,具有重要的现实意义。

一、中国航天系统工程的形成

20世纪40年代末、50年代初,钱学森博士以锐敏的眼光全面观察第二次世界大战后迅速发展的控制与制导工程技术,提出了指导控制与制导系统设计的普遍性原理、理论和方法,从而创建了作为一门技术科学的"工程控制论"。他在《工程控制论》一书中,阐明了工程控制论基本理论和观点,指明了进一步研究的方向,对自动化科学技术理论的发展起了重要作用,从深度和广度上推动了电子计算机技术革命、核能技术革命和航天技术革命等的发展。

系统论、控制论和信息论是系统工程的理论基础。

钱学森对中国发展导弹、火箭情有独钟。他受命组建国防部第五研究院后,即着手组织导弹的研制工作。研制导弹是现代科学技术和基础工业相结合的大规模的系统工程。导弹通常由多个分系统、子系统和单元设备组成。他根据导弹的结构和内在联系,首先组建总设计师室和空气动力、结构强度、发动机、推进剂、控制系统、控制元件、无线电、计算技术和技术物理等10个研究室,作为起步工作。在争得了前苏联的技术援助后,为适应导弹研制工作的需要,于1957年11月,国防部五院在10个研究室的基础上成立了两个分院,确立了专业院的体制。一分院负责各类导弹的总体设计和弹体、发动机的研制。二分院负责各类导弹控制系统的研制。

钱学森曾说:"中国在那样一个工业、技术都很落后的情况下搞'两弹',没有社会主义制度是不行的,那就是党中央、毛主席一声令下,没二话,我们就干,而直接领导者,组织者就是周恩来总理和聂帅。"他运用并发展了过去从事喷气推进工作的经验,在组织中国导

弹研制工作中,把当时苏联在航天技术发展中的总体设计部和我国组织人民军队,指挥革命战争的那套经验结合起来,从而创造了一套组织领导"两弹"工作的方法,也就是今天称之为航天系统工程的组织管理。

专业院的组织体制,在仿制期间,基本上还相适应。到了自行设计阶段,为解决频繁的技术协调和行政指挥,国防部五院成立了两个总设计师室统管地地、地空导弹的协调和指挥。由于导弹系统内在的联系被割裂,给导弹研制工作增加了频繁而又跨院的技术协调,专业院的管理体制不适应自行设计工作的全面展开,一些问题本来开一个技术协调会、调度会就可解决的,也往往需要通过五院,并由五院出面组织协调,误时误事。即使成立了总设计师室,问题仍不能顺利解决。特别是中近程导弹第一次试射失败后,各种矛盾和问题接连出现。这里有总体与各分系统的关系;有技术抓总与技术协调的问题;有技术民主与技术责任制的问题;有设计与研究、设计与试制、设计与试验、试制与试验的关系;有质量与进度,全局与局部的关系;有技术先进与现实可能等系统优化的问题。这里既有工程技术的优化问题,也有组织管理的优化问题。在总结中近程导弹首次试射失利的过程中,国防部五院根据《科学十四条》的精神和导弹研制的实践经验,系统地总结了导弹研制工作的规律,颁布了《国防部第五研究院暂行条例》(草案),建立了总设计师制度,明确了总体设计的地位与作用,建立和加强了技术指挥系统和行政指挥调度系统,使导弹研制工作进一步走上正规化和科学化。

1964年,一个按"型号配套,自成系统"的型号院的管理体制应运而生。它包括导弹的总体设计、弹体结构和弹头、控制系统(包括惯性器件)、火箭发动机、地面设备、材料与工艺、强度与环境、遥测、发动机试验、计算机应用、计量测试等门类齐全的设计研究所、工厂和试验站,研究、设计、试制、试验、生产等技术力量比较配套,能对导弹研制实行统一领导、集中管理。这样一种体制,研制力量集中,工作重点突出,技术协调工作一般不需跨院进行,缩短、畅通了渠道,提高了工作效率,大大地促进了研制工作的进展,快出成果,多出人才。

型号院的形成,是在老一辈革命家的培育、指导和钱学森博士的直接领导下,长期科研生产实践的结晶。型号院是根据航天技术发展的特点和规律,运用系统工程的理论和方法逐步建立起来的,是在工程技术和组织管理两个方面相互联系、互为补充而达到两个优化的最佳的组织形式。

型号院的形成,表明中国航天系统工程的理论、理念日趋完善,并在实践中越来越显示出它对发展中国航天事业产生的巨大作用。吴邦国副总理曾明确指出,航天和别的比较,航天能够出东西,主要是航天型号研究院的体制能出成果。

二、中国战略导弹与运载火箭成就辉煌

20世纪50年代,我国尚处在帝国主义的封锁、包围和威胁之中。为了增强我国国防

和保卫世界和平，党中央下定了决心发展航天技术，制定了“自力更生为主，力争外援和利用资本主义国家已有的科学成果”的方针。尔后又明确地提出“两弹为主，导弹第一”。

研制导弹，这是一种社会行为。它提供的不是一般的社会生活用品，而是关系到保卫世界和平和国家安全的特殊产品，充分体现党和国家乃至全民族的最高利益。因此，每一个航天工程立项，都是由党中央和国家最高领导层纵观全局后作出的决策。国防部五院和后来成立的各个分院只是遵照中央的部署，运用钱学森系统工程的理念、方法组织各项研制工作。

从 1956 年 10 月国防部第五研究院成立算起，中国航天人用 15 年光景走完了从近程、中近程、中程、中远程、远程洲际导弹的全过程。在苏联撤走专家之前，我们曾得到过苏联的一些技术援助。专家撤走后，我们是完全依靠自己的力量走出一条有中国特色发展导弹技术的道路。在充分预先研究的基础上，1966 年以来，我国先后独立研制成功的有中程、中远程、远程洲际导弹。特别是 1966 年 10 月，用我们自己研制的导弹装上核装置(通常称为核弹)，在中国本土成功地进行了导弹核武器试验，震惊了国内外，使世人刮目相看。

这些成就来之不易，我们是在一穷二白的基础上搞导弹的。无论是仿制，还是后来的自行设计，都有重重困难。在钱学森院长的系统工程理论指导下，成千上万个导弹零组部件以及各种原材料、元器件一个个落实；国内成百上千家科研生产单位分工协作、全力配合，大胆探索，试制攻关，或寻找代料，或少量进口，问题都一个个解决了。在仿制近程导弹时，主要承制厂就有 60 多个，加上二次协作厂有 100 多个，全国直接、间接参加仿制的有 1 400 多个单位。没有他们的全力支持，没有航天系统工程的统筹运转，是不可能有今天这样的辉煌成就的。

运载火箭技术是在战略导弹基础上发展起来的。还在 1965 年开始研制中远程、远程洲际导弹的时候，中国就开始研制运载火箭。经过 30 多年艰苦拼搏，研制成功了 12 种不同类型的“长征”运载火箭。这些火箭用来发射近地轨道卫星、发射太阳同步轨道卫星和发射地球同步静止轨道卫星，其运载能力分别达到 0.3～13t、1.5～6.1t 和 1.5～5.2t 。这些火箭，既有串联又有串联加并联(捆绑)的结构形式；既有不易挥发便于储存的常温液体推进剂，也有易挥发的液氢液氧高能推进剂，还有固体推进剂；既有采用惯性稳定平台的制导系统，也有采用将惯性仪表直接固定在箭体结构上的捷联式惯性制导系统；火箭末级发动机既可以一次点火，也可以两次启动；既可一箭发射单星，也可一箭发射双星以至多星。“长征”火箭入轨精度高，对发射不同轨道卫星的适应能力强，经济性能也相当好，火箭的综合技术性能达到世界先进水平。

1999 年 11 月，“长征二号 F”火箭发射我国“神舟一号”飞船成功，为我国实现载人航天的战略目标奠定了基础。

到 20 世纪末，长征系列火箭已发射国内外卫星 64 次(其中外国星 21 次)，将 72 个航天器(含 27 个外国星)送入预定轨道，发射成功率约 90%。在世界高新技术领域中，中国

占有了一席之地。

中国发展战略导弹、运载火箭事业所取得的辉煌成就,归功于三代中央领导集体的关怀、领导,归功于社会主义制度下的全国大协作,归功于中国航天人在钱学森博士的率领下,无私奉献,自力更生,奋斗攀登。这里,我们所要特别强调的是,钱学森博士所创建的中国航天系统工程在其中发挥了极其重要的作用。

三、运用航天系统工程的典型范例

在中国导弹、火箭事业的发展过程中,航天系统工程的重要作用,给航天人留下了极其深刻的印象。

其一,西昌的70个日日夜夜。1984年1月29日,“长征3号”火箭首飞失利。能否抢在4月的发射窗口再次组织发射,这是对研究院技术水平、管理能力的严峻挑战。从分析故障、复现故障到提出故障模式、修改设计方案;从图纸下厂生产试验件到零件试验,整机试车,设计、生产、试验,环环相扣。技术措施正确得当,组织管理及时有力。“长征3号”火箭第二发火箭终于4月8日再次升空,胜利地将我国第一颗试验通信卫星送入预定轨道。从1月29日发射失利到4月8日发射成功,只有70天的时间。在这样短的时间里,解决这样复杂的高新技术,完成这么紧迫的生产试验任务,这在世界航天史上没有先例,充分显示了中国航天人的智慧和胆略,也充分显示了航天系统工程在工程技术和组织管理两个方面对解决突发工程难题的特殊作用。中国的运载火箭技术进入了世界先进行列。

其二,18个月研制成功“长征2号”捆绑火箭。为了走向世界,中国航天人甘冒巨大的政治风险、经济风险和技术风险。要在18个月内把“长征2号”捆绑火箭竖在发射台上,并且一次发射成功,中国运载火箭技术研究院根据中央的决策和上级的决定,发挥航天系统工程的管理优势,建立健全行政指挥调度系统、技术指挥系统、质量保障系统,明确任务、落实责任、畅通渠道、各负其责。在设计、生产、试验、发射每个环节都有硬仗,必须向管理要时间。在组织实施过程中,指挥调度系统会同技术指挥系统,采取了一系列切实有效的战略措施:在整个研制过程中,实施设计出图与物资备料、设计与工艺准备、工艺审查与生产准备、生产与试验、研制与靶场准备五个交叉作业,赢得了时间。领导深入第一线,现场发现问题,现场解决问题。1990年7月16日,中国第一枚大推力“长二捆”运载火箭如期发射,一举成功。“长二捆”火箭的研制成功,使我国火箭近地轨道的运载能力翻了近两番,它在国内外产生了重大的影响,“是20世纪90年代中国航天技术发展的一个新里程碑”,“创造了世界航天史的又一个奇迹”。没有型号院这样的组织体制,没有系统工程管理理念和有效的举措是不可能出现这样的奇迹的。

其三,四年四连冠。由计划经济向市场经济转轨的过程中,航天产品的高质量、高可靠性受到了方方面面因素的影响和制约。1996年2月15日“长征3号乙”火箭首发没有成

功。8月18日“长征3号”发射又一次遭受挫折。一时间,中国运载火箭技术研究院面临着前所未有的严峻形势,承受着来自国内外的巨大压力,到了“失败不起,没有退路,只能成功”的境地。全院干部职工卧薪尝胆,统一认识,按航天系统工程理论、理念和工作方法,贯彻“严上加严,细上加细,慎之又慎”工作精神,贯彻执行强化科研生产管理和质量管理的“72条”、“28条”,严格执行质量问题归零的“双五条”标准,落实质量责任制,建立激励约束机制,终于取得了连续四年导弹和运载火箭发射发发成功的佳绩。这是建院40多年的创举。它再一次显示了以人为本的航天系统工程的作用。

运用航天系统工程的范例,还有许许多多,比如总体设计部在技术抓总、优化设计和技术协调等方面的作用,“两条指挥线”相互配合、相互渗透、相得益彰。中国航天系统工程的建立和发展,大大推动了中国航天事业的发展,反过来中国航天事业的迅猛发展,又不断完善和丰富了中国航天系统工程的理论、理念和方法。

时代在前进,社会在发展,科技在进步,改革在深化。航天事业是复杂的、典型的大型系统工程,牵涉到国家的政治、经济、军事以及国民经济各部门。它是知识与技术高度密集的领域,是现代科学技术的高度综合与运用,是国家综合国力和科学技术水平的重要标志之一。每一项航天工程都是多种学科、多种专业在一个总体思想指导下有机结合的综合技术工程体系,它不仅技术高、新、难、尖、精,综合性强、协作面广、研制周期长,规模大、高投入、高风险、高质量、高可靠,并且是有很大的研究探索性,研制、试验人员要付出艰辛和创造性劳动,等等。中国的导弹和运载火箭正是根据这些特点和规律,实现了集中统一领导的系统科学管理方法,保证了一系列航天工程研制成功,走出了具有中国特色的导弹与运载火箭事业自己的发展道路。可以说40多年来导弹与运载火箭事业不仅取得了辉煌的成就,而且,培养和锻炼了一支具有丰富实践经验的科技、管理队伍,并且积累、形成和发展了一整套的大型复杂系统工程的管理办法。实践证明:这些办法,过去适用,现在仍然适用,将来也一定能发挥更大的作用。特别是我们所建立的完整的总指挥负责制下的技术指挥系统,行政调度指挥系统及相应的工艺师系统、经济师系统和质量安全保障系统以及总体设计部、型号院的管理体制等等,这些都在大型系统工程研制过程中发挥了重要的作用。

人类进入21世纪,在实行市场经济的中国,型号研究院如何进一步发挥航天系统工程的作用,以适应新的形势的发展,这是一个值得重视的大课题。对此,我们必须以“三个代表”的思想作指导,以“三个有利于”为标准,实事求是地认真研究寻求出一个最佳的科学答案。

今天,全国各个部门、各条战线,都在推广钱老关于系统工程的理论、理念和方法。我们航天人自己怎么办?我们应该铭记钱老对航天事业所做出的重大贡献,发扬光大钱老关于系统工程的学术思想,多出成果,快出成果。我们应当继续努力保持和争得在世界航天领域取得的前列地位。若得而复失,我们将愧对先辈,也愧对后人。

航天系统工程与总体设计部

——钱学森同志在发展我国系统 工程理论与实践中的贡献

陈明仲

钱学森同志回国后,就把自己的全部智慧与精力贡献给了祖国的科学发展与“两弹一星”事业。1956年2月17日,在他回国不久,就向国务院报送《建立中国航空工业的意见》,对发展我国导弹技术提出了精辟的建议,从而引起了党和国家领导人的重视。周恩来总理于3月14日亲自主持军委会议,进一步听取钱学森同志关于发展导弹事业的规划设想。党中央果断地作出发展国防尖端技术的决策。任命钱学森为国防部第五研究院院长,后来建立分院时又兼任一分院(即运载火箭技术研究院)院长。在他的领导下,我国的导弹技术以惊人的速度,在二十多年里,就把我国航天技术提高到国际水平。在“扬国威,壮军威,振民心”的伟大事业中,他做出了重大、特殊的贡献。

作为一名科学家,钱学森带领我们攀登科学高峰,攻克了许多航天技术难关。作为一名领导者,他关心年轻一代的成长,亲自给大家讲课、做报告,还教育大家搞工作一定要“认真”,鼓励年轻人要有“爬坡”精神。作为一名技术领头人,他总是高瞻远瞩地为我们指明技术发展方向:多次在关键时候,带领大家制订正确的长远规划;在刚起步自行研制导弹时,他就指出在研制弹头时必须考虑“突反”问题;在考虑发展第二代导弹固体化时,他又指出应同时考虑仪器小型化,等等。更为难能可贵的是,早在20世纪60年代初期,他运用系统科学知识,率领我们在自行研制导弹的实践时,建立航天系统工程与总体设计部思想与方法,为我国建立系统工程学科打下坚实的基础与范例。下面仅就此概述钱学森同志在中国系统工程理论与方法的历史发展中的地位与作用。

一

“系统”作为一个概念不是人类生来就有的,也不像有些人讲的,是在20世纪40年代出现于西方。钱学森同志认为,系统概念源于人类的社会劳动实践。古代的农事、工程、医药、天文等方面的实践,逐步形成古代的朴素唯物自然观的系统概念。但随着自然科学的兴起与发展,人类对社会和自然界的认识逐步深化,由隔离、分析到综合、整体的漫长过程后,才认识到物质世界是由无数相互联系、依赖、制约的事物和过程所形成的统一整体。到了20世纪,现代科学技术的成就又为系统思想提供了定量方法和计算工具,为形成系统工程创造了条件。总之,系统思想是从经验到哲学到科学,从思辨到定性到定量的

过程。

由此可以看出,系统工程的形成与发展是有一定的历史背景和条件的。首先,20世纪的科学技术、社会、政治、军事和经济等各个方面,组织日显复杂,出现了许多综合性很高的相互联系和互相制约的系统,而它们又是一个更大的系统的组成部分。系统工程就是组织管理这种系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的方法。到了40年代,由于第二次世界大战的需要,极大地推动了系统工程方法的应用。战后,西方各国军事生产的一大部分在短时间内迅速转变为民用,从而使生产力得到了巨大发展和加深了生产社会化的程度。与此同时,社会主义国家也通过改革自己的经济体制,加速经济的发展。还有一些新兴国家也在力求改变自己的国际地位,从而使世界性的竞争日趋激烈。所以,运用系统工程的理论与方法,来研究解决社会、工程项目和企业管理,已成为近几十年来占主导的现代化科学管理的重要内容。

二

系统工程在我国进行有组织、有系统的研究与应用,是在20世纪60年代以后的事。然而,早在50年代初期,我国就有一些学者开始注意这件事,并进行一些研究。例如,尚在美国受迫害的钱学森,就通过回国的人带信给国内学者,提出要宣传、引进运筹学,把它用到社会主义建设中去。当他一回到祖国,立即建议把这门学科运用于经济建设,并跟许国志同志一起创立运筹小组和研究室。后来,他先后提出了:“把社会科学从量的侧面来精确化”与“精确化了的政治经济学就能把国民经济规划作得更好更正确”等学术论点,另外还出版了《控制论》等专著。此时,国内一些高等院校也开始成立有关专业。特别是一些学者开始把运筹学应用于国民经济建设和军事科学的发展,如华罗庚同志在全国许多省市推广优选法也取得了明显成效。在此期间,在国防科研单位工作的钱学森同志带领航天科研工作者,在成功地进行导弹研制的实践中,指导大家运用系统工程的观点与方法,树立总体概念、制定研制程序图、建立两条指挥线和强化总体设计等等。这不仅加快了我国导弹与空间技术的发展速度,而且在建立航天系统工程与总体设计部方面取得了开创性的实践与研究的成果。

党的十一届三中全会为科学发展带来了春天,同样也使系统工程的推广与应用出现了新的局面。1978年,以钱学森为代表的一些科学家,提出利用系统思想把运筹学和管理科学统一起来的见解与系统工程是组织管理技术的思想。1979年10月,中国科学院、社会科学院、国防各工业部、教育部,以及国防军事领导机关等,在北京联合召开了系统工程学术讨论会。会上,钱学森等21名著名学者联合提议成立中国系统工程学会。次年8月,中国系统工程学会即告成立,实现了自然科学与社会科学的结合,并选出钱学森、薛慕桥担任名誉理事长。这标志我国系统工程的研究与应用进入了一个崭新的阶段。在这之后,钱学森等专家、学者还通过中央人民广播电台、中央电视台等媒体向全国推广系统工

程有关理论与方法，为推动我国改革开放、发展经济增添力量。

三

大家都知道，每个航天型号产品都是由许多功能不同、专业工程各异而又相互联系、相互制约的分系统组成的一个庞大而复杂的系统。研制这样的系统，必须考虑与协调的因素很多：①不仅涉及科学技术、生产工艺与科学试验本身的问题，还要考虑国家的政治、军事、经济等诸多方面的条件。②它的研制需要全国不同领域、不同行业，多达数以千计的部门和单位的支持与参与。③研制周期较长，一般新的型号要长达数年之久，需经历指标论证、方案设计、初步设计、技术设计各阶段，同时还要进行初样与试样的试制生产，经过充分的地面试验之后，才能进行飞行试验，最后才定型。④对质量要求十分苛刻，任何细小差错，都会造成整体的失败。因此，要求整体优化、协调，无论是工程技术本身，还是组织管理全过程，都必须依靠系统工程的方法来实现。

在航天系统工程中包括工程技术与组织管理两个并行的优化过程。其中，工程技术系统是管理系统的控制对象。所以加速发展航天事业，要认真实行系统工程管理，只有在优化管理过程中，才能实现型号产品技术的先进性；但是，工程技术的优化又是它的前提，两者是互相联系的。为保证在这两个优化过程中能起到独特的作用，就必须建立和强化总体设计部。它是具有“三种功能，两种性质”的特殊单位。三种功能是设计、咨询与管理；两种性能是指既是科技工作者，又是工程技术管理者。这是其他科研单位与业务机关所不能代替的。

(1)总体设计部在航天型号研制过程中是直接参加者。在研制中不仅承担工程的总体设计，而且还负责一些分系统的设计、试制与试验任务，特别是弹(箭)体结构分系统又是搞好总体工作，保证整体协调与优化所必须。由此可见，它承担许多具体技术工作，这与业务机关只承担组织管理，而不参加技术工作是不同的。

(2)总体设计部还承担搜集、研究与分析当代航天技术发展的态势，结合我国情况，积极提出发展航天事业的规划设想与建议，并为型号研制探索技术发展途径，提出预先研究课题等，为国家和上级决策、计划安排、投资预算、技术管理等提供咨询性建议。从这方面讲，总体设计部带有咨询功能。但是，它在整个工程研制中，自始至终又是工程优化过程的执行者，对总体性能指标、方案设计、各分系统之间的协调与总体的优化负有责任。这与一般咨询机构又有不同。

(3)总体设计部是以自己技术活动实践为基础参与工程研制的组织管理。例如，为工程研制确定技术指标(包括各分系统的指标)、编制研制程序，制定总的技术条件、研制周期与经费估算等资料。还为保证飞行试验做到“万无一失”，需要制订一整套严密的地面各种试验计划与可靠性保证大纲。总体设计部还是总设计师的办事机构，直接承担技术行政事务。因此，总体设计部又具有一定的管理职能，这是一般科研单位与工厂所没

有的。

总之，完善与强化总体设计部，是满足航天工程研制的需要，是运用系统工程方法通过实践而产生的。总体设计部既是航天工程研制的技术总参谋部，又是直接参与研制工作的实体。正如钱学森同志所指出的："我们在搞国防尖端技术的时候，发现要指挥如此之大的社会劳动，需要一个为领导当技术参谋的部门。也就是说，靠一个总工程师或总设计师，加上几个副总设计师，这么几个人，已经不能应付局面，已经不能够适应复杂的抓总工作了。必须有一个在我们工作当中，称之为总体设计部门。他们不是几十人，而是很多学科配套、专业齐全、具有丰富研制经验的高技术科技队伍。他们在发展我国航天事业中起到独特的作用。"对于这一成功的经验，我们敬爱的周恩来总理生前曾希望，能把这一总体设计部经验推广到国民经济建设的重大工程建设上去。

20 世纪 80 年代后，钱学森同志离开航天部，调到国防科工委工作，但他十分关心航天系统的提高与应用，除了组织国防科研工业系统进行交流外，还要求我们走出去，多参加一些国民经济重大工程建设项目的讨论与交流。而他自己更是身体力行，亲自指导、参与七一〇所的研究工作，取得了良好效果。更为可贵的是，高龄的钱学森同志还多次向中央有关部门直到中央常委提出建议，把"两弹一星"的系统工程方法与总体设计部经验，推广应用到国家机构改革与国民经济建设中去，为此受到中央领导的赞赏与支持。1991 年，江泽民总书记在党的 70 周年纪念大会上的讲话中说：中国的改革是一个巨大复杂的系统工程问题，包括经济、政治、教育、科技、文化、体制等方面的改革，需要互相协调配套进行。在党的 80 周年纪念大会上，江总书记更从理论的高度，提出"三个代表"的光辉思想。这些无疑为发展、运用系统工程指明了方向。

作者简历：陈明仲　1930 年 9 月生于福州市。1949 年参加中国人民解放军，在步兵学校任教员。1952 年调哈尔滨军事工程学院空军工程系学习，1957 年毕业，分配到国防部第五研究院一分院一部工作，从事总体设计，参加过"1059"、"东风 2 号"型号研制，1961 年评为工程师、副主任设计师。1964 年调院机关工作，任调研科长。1970 年调四部，任生产组长（科技处长）、科技委常委、改革办主任、高级工程师。1986 年底调一部，负责改革工作，1991 年初退休。退休后参加一些有关系统工程管理方面的学术活动，先后参与编著《运载火箭系统工程管理》、《航天工程计划调度管理》等书籍。

钱学森与航天系统工程

赵少奎

一、前　言

钱学森院士对系统工程的探索与实践，严格地讲，是在美国从事现代火箭、导弹研究的开创时期起步的。钱学森抱着科学救国的理想，远涉重洋到美国求学，选择了航空工程与工程力学的专业方向，他的研究领域十分宽广，但是，他紧紧瞄准航空和火箭技术的发展方向，20世纪30年代末，他就积极地投入到美国现代火箭、导弹的研究工作中，使其成为美国现代航天科技的重要奠基人之一。钱学森院士曾明确地指出："我是从搞工程技术走向科学论的……"。在各种工程技术中，对他形成现代科学观影响最深远的应当说是系统工程。在开创现代航天科技的实践中，钱学森不仅深深感受到现代工程科学技术的魅力，而且在这块高科技的沃土上，萌发了他的航天系统工程的理念。可以这样讲：在钱学森从事工程科学技术探索与实践的漫长岁月中，系统工程是其影响最广、最深远的事业之一。

钱学森的系统工程理念虽然是在美国开始孕育的，但是，航天系统工程理论、方法体系的建立是在他回归祖国后，在老一辈无产阶级革命家的领导下，承担起我国航天科技主帅的重任之后，与他的战友们在解决我国航天科技发展的一系列重大问题的实践过程中，逐步完善，并走向成熟的。在回顾我国导弹与航天事业激动人心的发展历程，展望世界现代工程科学技术发展的壮观前景的时候，我们难以忘怀钱学森院士在周恩来总理、聂荣臻元帅的直接领导下，带领航天人所经历的开创我国导弹与航天事业，并且结合我国的实际，创新建立航天系统工程的不平凡历程和辉煌业绩。

二、钱学森的现代工程科学观

1936年初秋，在美国加州理工学院，钱学森师从世界著名的航空工程与力学大师冯·卡门，1939年取得航空、数学双博士学位后，成为冯·卡门的得力助手与合作者。在进行现代工程科学研究的起步阶段，钱学森就有幸对高速飞行器的"声障"、"热障"和"薄壳结构稳定性"等前沿性课题进行一系列开创性的研究工作，并有机会参与了美国现代火箭、导弹技术的开创工作，为其在20世纪40年代超前建立现代工程科学观，创造了得天独厚的条件。

通过近20年现代工程科学技术前沿领域的研究与教学实践，在导师冯·卡门现代科学思想的影响下，钱学森深刻地认识到：在现代自然科学与工程技术之间已经形成了一个独立的科学体系，即现代工程科学，现代科学与工程相结合对推动国家发展具有极端重要性，已经成为决定国家和国际事物的关键因素。

1948年，钱学森发表了“工程与工程科学”的论文，明确地指出：当代，科学与技术研究已经不再是没有计划的个人活动，任何一个大国的政府都已经认识到，这种研究是增强国力和国民福利的关键所在，因此，必须严密地加以组织。并且指出：“纯科学的发现与工业应用之间的距离已经很短，留长发的纯科学家与理短发的工程师之间的差别也非常之小，他们之间的紧密合作需求产生了一种新的职业，就是工程科学家，他们在纯科学与工程之间架起了桥梁，运用基础知识解决工程的实际问题。”在这一时期，钱学森向他的导师冯·卡门明确地提出：“火箭导弹技术同其他类型的武器所要求的技术完全不同，必须委托给军事部门的一个新的团体，要用新的军事思想和思想方法进行研究……”并建议美国应成立一个“喷气武器部”，统一组织领导火箭导弹技术的发展工作。可见，钱学森在开创美国现代火箭与导弹事业的过程中，已经逐步明确地建立起了现代工程科学的理念：

(1)在现代自然科学与工程技术之间已经形成了一个独立的科学体系，即现代工程科学体系；

(2)科学与技术研究已经不再是没有计划的个人活动，任何一个大国的政府都应当认识到，现代科学与技术研究已经是增强国力和国民福利的关键所在，因此，必须进行严密、科学的组织管理；

(3)纯科学的发现与工程应用之间的距离已经缩短，自然科学家与工程师之间的差别也在缩小，在他们之间产生了一种新的职业——工程技术科学家，他们在纯科学与现代工程之间架起了桥梁，把传统工程的内涵推进到现代工程技术发展的新阶段(见图1)；

(4)火箭、导弹等复杂工程系统同其他简单工程装备的开发与运用完全不同，必须建立一种新的组织管理机制，用新的理论、技术思想和方法进行研究、开发和运用；

……

20世纪中期，随着运筹学、一般系统论、信息论和控制论的出现，计算机、火箭技术等的发明，推进了一门崭新的技术科学——工程系统工程的形成。在这一进程中，钱学森在美国加州理工学院喷气推进实验中心(JPC)担任第一任实验室主任与Goddard讲座教授，使JPC成为美国航天系统工程的重要发源地，并且于1954年秋，完成了《工程控制论》巨著，与此同时，他明确地指出：“一个社会主义国家搞建设，在如何进行组织管理，加强计划性方面，运筹学会起更重要作用”，这说明钱学森当时已经把握了系统工程最前沿的理论和方法，为回国后结合我国的实际，创新建立航天系统工程打下了坚实的基础，进行了必要的理论和技术准备。

三、中国航天工程的组织管理

在开创我国导弹与航天事业的进程中，钱学森首先遇到的难题，应当说不是导弹与航

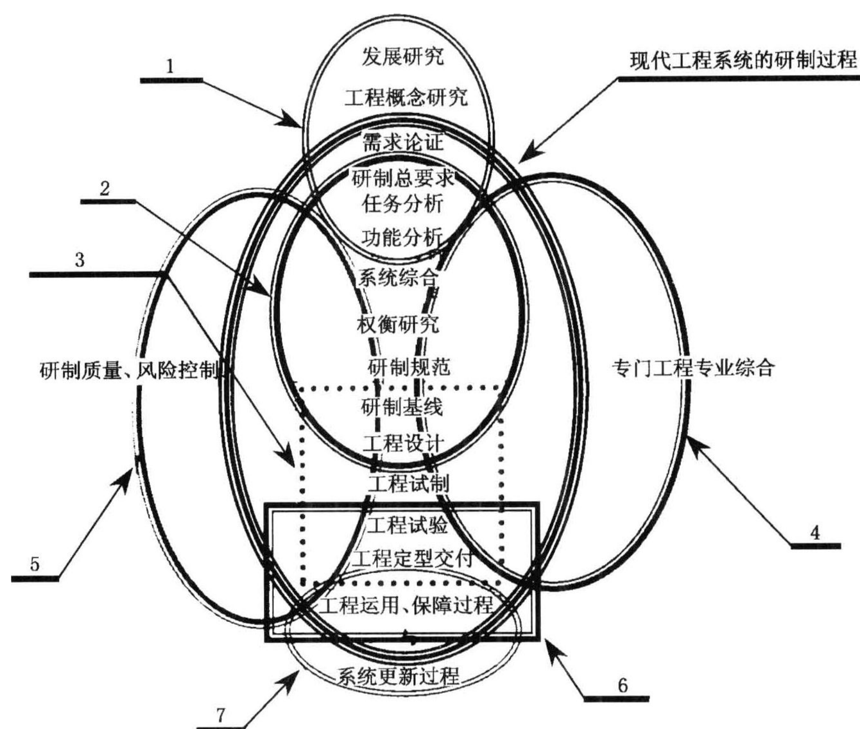


图 1 现代复杂工程系统的开发过程

1—宏观谋划过程;2—总体设计、运筹过程;3—传统工程研制过程;

4—工程整体性能扩展过程;5—研制全过程质量、风险管理过程;

6—研制成果转化过程;7—工程运用与需求再确定过程

天技术开发工作中的具体技术问题,而是如何运用科学的组织管理方法,组建一个高效、有序的导弹与火箭工程开发组织管理系统。如何把成千上万的研制人员、数量众多的研究、设计、试制、试验和生产单位、难以计数的研究、研制和试验设备、数量巨大的研究与研制经费、要求严格、种类繁多的物质、器材,按照现代工程科学的理念,导弹、火箭和航天技术开发的总目标要求,协调一致的组织起来,有序地投入到导弹、火箭与航天工程系统的研究、设计、试验、试制和生产过程中去,也就是钱学森提出的:建立一种"组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法"。

在创建我国导弹和火箭研制体系之初,钱学森就明确指出"健全的航空工业,除了制造工厂之外,还应该有一个强大的为设计服务的研究及试验单位,应该有一个做长远及基本研究的单位"。钱学森当时就清醒地认识到:现代复杂工程系统的开发与传统工程研制有很大不同(参见图 1),组织管理工作必须符合科学技术工作的客观规律,也要结合中国的具体情况,应当建立具有宏观谋划指导与系统设计运筹、控制与管理职能的总体研究机构。按照钱学森这一思想,借鉴前苏联航空技术总体设计部的经验,我国导弹、火箭与航天技术研究院陆续都建立起总体设计部,以及相关专业研究所、试制与生产厂和配套的试验基地,形成了我国航天系统独特的组织管理体系,把钱学森对我国导弹、火箭发展的宏观战略谋划付诸组织实施。钱学森在总结我国导弹与航天工程研制实践中形成的、起着

总设计师技术工作总参谋部作用的总体设计部的工作经验时指出:“这样复杂的总体协调任务不可能靠几个人来完成,因为他们不可能精通整个系统所涉及的全部专业知识,他们也不可能有足够的时间来完成数量惊人的技术协调工作。这就要求以一种组织、一个集体来代替先前的单个指挥者,对这种大规模社会化劳动进行协调指挥。”“他们不是几十个人,而是成千上百学科配套、专业齐全、具有丰富研制经验的高科技队伍。”总体设计部的人员通常按照工程任务和工程专业相结合的原则,既组成在工程项目任务周期内的任务协同组织,也称为工程目标组织或型号队伍,又组成按工程专业性质建立起来的相对固定的专业技术支持组织,或称专业室,形成矩阵式的总体设计部组织结构。总体设计部工作的出发点和归宿都是获得总体优化的目标工程系统,设计系统的“总体”,即系统的总体方案、实现整个系统的技术途径、提出对相关分系统的研制要求(或称“规范”),并贯彻到研制任务的始终。从而成为工程全系统、研制全过程的技术运筹与质量控制中心,这种新型的技术运筹、管理机制在我国航天工程系统研制工作中发挥了举足轻重、不可替代的重要作用。钱老明确指出:“总体设计部的实践,体现了一种科学方法,这种科学方法就是系统工程”。这一成功经验,周总理生前曾经期望把它推广到国民经济建设中去。

在我国航天事业的起步阶段,周总理、聂帅就明确:技术决策由科学家负责。由于周总理、聂荣臻元帅身体力行,聂帅对当时国防部五院领导提出了明确要求,为形成著名的研制工作“两条指挥线”的管理机制奠定了坚实的思想基础。一个由科学家、总设计师系统组成的技术指挥线;一个由部门领导、总指挥系统组成的调度指挥线,两者都向部门领导和上级领导负责,相互协同配合。技术管理体现了以科学技术为基础的科学决策,保障了技术决策的科学化与民主化;计划管理体现了权利为基础的决策执行机制,保证了决策的有效实施,把技术管理与调度指挥系统有机地结合起来,实现了人力、物力和经费等资源的优化运用,这是在我国航天科技开创与大发展时期形成的一种新的现代化的组织管理机制,它渗透着周总理、聂帅的心血,凝结着钱老与老五院领导集体的智慧。在科学技术突飞猛进发展的今天,面对越来越复杂的航天科技宏观谋划与开发决策的诸多难题,我们应当清醒地认识到:“两条指挥线”管理机制不仅没有过时,而且还具有新的时代内涵,仍然是现代系统工程开发管理的重要内容。

钱学森在美国时就提出的建立“喷气武器部”,在开创我国航天事业的过程中得以顺利实现。在党中央领导下,成立了“航空工业委员会”,后来组建了“国防科委”,形成了党中央决策层直接领导下的我国航天科技决策管理机构。在国防科委领导下,建立了我国导弹与航天科技决策实施机构——国防部五院,形成既有权威、又职责分工明确的三级决策(政治、宏观计划与技术、实施决策)管理机制,钱学森以其在我国导弹与航天科技领域首席科学家的独特地位,在我国导弹与航天科技开创与大发展时期,在我国导弹与航天科技三级决策管理机制中发挥了重要的技术咨询与技术决策的作用。

1958~1959年间,美国在研制“北极星导弹系统”的过程中,提炼出一种叫做“计划协调管理技术(Program Evaluation and Review Technique,缩写为“PERT”)”的大型工程开发管

理方法,取得了明显的成效。钱学森敏锐地认识到它的价值。1962年,在他的倡导和支持下,及时地把它移植到我国导弹与火箭研制管理中来,结合我国的实际,进行了试点。1963年,在研制战略导弹地面计算机的工作中,运用这种方法很快发现了研制短线,及时地采取了补救措施,使研制计划提前一个月完成。科学管理的成效,打开了人们的眼界,使系统工程管理技术很快在导弹和火箭参制单位全面推广,不仅明显地加快了研制与试验进度,而且更有效地利用了我国有限的人力、物力和财力资源。20世纪80年代,在完成我国太平洋火箭试验、水下发射潜地导弹试验和发射我国地球同步卫星等重大科研活动中,都采用了系统工程管理技术,取得了很大成功,并且推广到我国国民经济建设的诸多部门,取得了重大效益。钱学森及时引进、推广,并结合我国的实际发展了系统工程管理技术,功不可没。

恩格斯说过:"一个民族要站在科学的最高峰,就一刻也不能没有理论思维"。但是,进行理论创新,不仅需要脚踏实地的科学态度、不畏艰险的科学精神,还要有超出常人的自信心、勇气和智慧。在开创我国航天科技事业的长征中,钱学森院士提出了一系列有创见的理论思维,把理论创新、技术创新、体制创新和管理机制创新有机地结合起来。在周总理与聂帅的直接领导,在钱学森院士现代工程科学技术理念的指导下,国防部五院(包括后来的七机部)领导集体明智、坚定、有效地强化了总体设计部在研制全过程全局性谋划与全系统综合集成中的技术运筹、协调和管理机制;推进了两条指挥线分工明确、协调配合的组织管理机制,实施了航天发展宏观谋划"三步棋"指导、航天产品"三阶段"研制程序管理、航天产品开发三个层次分级决策管理机制,并且大力推广了系统工程的理论和方法,使我国用最少的投入,比西方发达国家短得多的周期,走向世界航天大国的道路,创造了人类科技发展的奇迹。

四、中国航天发展的宏观谋划

面对我国航天工程开创与大发展时期的繁重任务,摆在钱学森面前的一个重要课题是导弹与航天系统宏观发展战略谋划问题(参见图1、图2)。复杂的航天科技发展宏观战略谋划,涉及时间跨度较长的科技发展预测、工业发达国家航天科技发展形势分析,我国科学技术与工业生产能力、发展潜力分析与预测,以及其他诸多相关环境因素的分析、综合与预测等复杂问题,是难度很大的研究课题。总结几十年的经验教训,世界各国都是组织国内最高水平的科学家、工程师担此重任。也只有在相关科学技术领域中站得很高、具有高度责任感的人,才能做好这样的宏观发展战略谋划工作。钱学森院士深知肩负的重任,在我国航天科技开创和大发展时期,对我国航天事业的宏观发展谋划付出了一位大科学家的辛勤劳动和聪明才智,做出了不可磨灭的重大贡献。

1956年2月17日,在周总理的鼓励下,怀着对新中国国防事业的强烈责任感,钱学森给中央写了关于《建立我国国防航空工业的意见书》。钱学森的《意见书》,实际上就是中

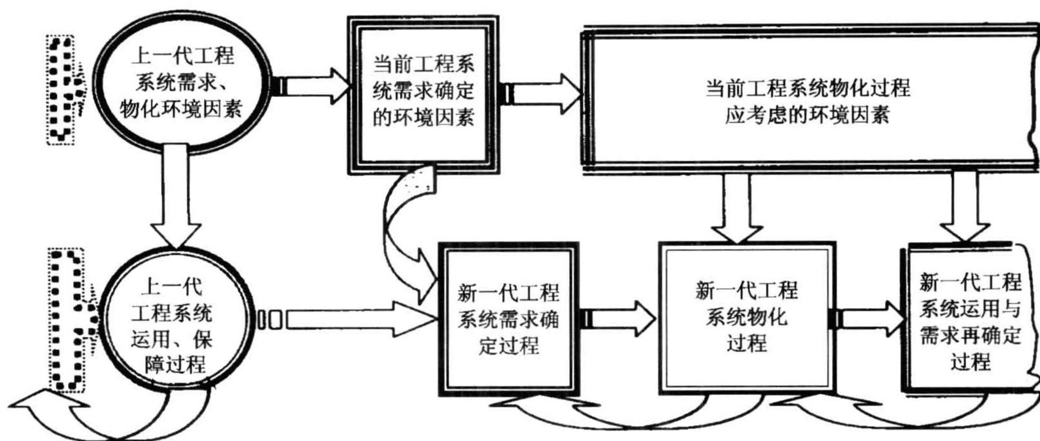


图 2 现代复杂工程系统开发过程示意图

国发展导弹、火箭与航天事业的宣言和行动纲领，引起了党中央、毛主席的高度重视。

1956 年春，周总理组织数百名科学家、技术专家制定了《1956～1967 年科学技术发展远景规划纲要》，由钱学森主持拟订了“喷气和火箭技术的建立”的规划。根据钱学森的《意见书》和主持制定的“喷气和火箭技术的建立”的规划，正式启动了我国的导弹与火箭事业：

(1)1958 年 1 月 9 日，钱学森主持制定了国防部五院第二个五年计划期间(1958～1962)的研制规划。

(2)1958 年 2 月，中国科学院成立了以钱学森为组长的领导小组，负责筹建我国人造卫星、运载火箭、卫星探测仪器等的设计、协调和研究机构，启动了我国航天科技事业。并在国防部五院主持制定了《喷气与火箭技术十年(1958～1967)发展规划纲要》。

(3)1964 年春，在周总理的直接领导和关怀下，钱学森负责组织了我国著名的战略导弹武器发展大讨论，制定了我国地地弹道导弹发展的“八年四弹”规划，得到中央批准，并组织实施。

(4)1965 年 1 月 8 日，钱学森正式提出“早日制定我国人造卫星研究计划，并列入国家计划”的报告，建议国家早日制定我国人造卫星研究计划，并列入国家任务，促进了这项重大国防科学技术的发展。

(5)1968 年 5 月 30 日，作为中国空间研究院院长，他直接领导编制了《我国人造卫星、宇宙飞船十年规划(草案)》。

(6)1974 年 9 月，钱学森院士主持国防科委会议，邀请我国“718”工程、海军领导和有关部委领导听取了七机部一院《关于向太平洋海域发射我国远程运载火箭的试验方案和请求开展我国首次远洋考察的报告》，当即部署国防科委机关向中央起草报告，着手开展我国远洋考察工作，正式启动了我国首批太平洋海域运载火箭试验的准备工作，并且亲自承担起运筹、指导震惊中外的我国首批太平洋火箭试验的任务。

在我国航天事业发展的相当长时间里,在对我国航天事业发展进行宏观发展谋划的过程中,钱学森院士不仅及时地提出了一系列具有远见卓识的宏观谋划意见,而且早在1956年,在国防部五院初创时期,就创建了我国第一个军事运筹学的研究机构——国防部五院作战研究处,开辟了运筹学面向我国武器装备规划论证的发展方向……应当说钱学森院士是在我国航天科技发展历程中"登高望远"的人,是我国导弹、火箭与航天技术领域的首席科学家,航天技术发展的宏观谋划战略家,航天技术战略决策运筹与管理的主要组织者。他在我国导弹、火箭与航天事业发展相当长的时期内是站在宏观战略谋划、重大技术决策管理层次上的帅才,我们应从我国导弹与航天事业宏观战略谋划管理、具有远见卓识技术决策的视角,来全面评价钱老对我国航天科技事业发展做出的卓越贡献。

五、中国航天发展的科学决策

系统工程管理的主要任务之一是适时地作出正确、具有远见卓识的决策。能否形成正确、高明的工程发展与实施决策,决策之后,能否创造性地去实施工程计划,最关键的问题之一是能否物色到具有运筹、组织、实施工程计划能力的人才。因此,"决策和人"是实施系统工程管理的关键因素。

在总结我国航天科技开创与大发展时期的经验教训时,钱学森院士语重心长地指出:"当时在党中央、毛主席的领导下,由周总理和聂帅具体组织实施,他们采取什么办法组织实施这项巨大的系统工程呢?就是民主集中制的办法。一是真正发扬民主……二是高度集中……。我在周总理和聂老总领导下做技术工作,做技术决策,也按周总理和聂老总的办法,实行民主集中制。……由于我们既讲民主,又讲集中,而且是真正的民主,高度的集中,所以把方方面面的积极性都调动起来了……"在钱学森院士离开航天科研第一线领导岗位后,他仍然不断提醒新一代领导人要注意"发扬技术民主,实行民主集中制"。1996年7月16日,钱老给航天集团总公司刘纪原总经理的信中写到:"您信中说今年10月将是我国航天事业创建40周年,并嘱咐我写几句话。我对航天事业已经发表过许多文字,现在回想起来,最重要的实在只有一句话:我们航天事业的科技人员在周恩来总理和聂荣臻元帅领导下,贯彻了民主集中制,我们今后仍必须坚持民主集中制。"他殷切地希望把"民主集中制"作为航天事业的宝贵财富发扬光大,是钱老发自内心"尊重知识,尊重人才"美德的表现,也是钱老深刻认识到民主集中制是实施正确决策的制度保障。

在回顾领导航天科技事业技术决策的具体办法时,钱学森院士明确地指出:"我的办法就是依靠集体,记得那时,每个星期天下午,我就把任新民、屠守锷、黄纬禄、梁守磐、庄逢甘等几位总工,还有林爽同志,请到我家去议事。有什么问题,大家提出来,共同研究解决。不同意见,尽量发表。但是,议定的事都要执行。执行中发现有什么差错,要尽快改正。我们中国的导弹就是这么干出来的。"可见,钱老深刻地认识到:专家集体是正确决策的智慧源泉。

随着科学技术的突飞猛进发展,面对越来越复杂的世界,越来越复杂的航天高技术工程系统的宏观谋划与开发决策问题,主要依靠领域专家已经越来越困难重重。当今时代,任何个人和单一职能部门都有其知识、能力和工作的局限性,在复杂问题决策面前,越来越显得力不从心。20世纪80年代以来,钱老站在航天科技的"群山之巅",总结几十年来航天科技研究、组织、决策管理的实践经验,潜心研究系统科学,20世纪80年代初提出将科学理论、经验知识、专家的判断力相结合,通过半理论、半经验的方法来处理复杂系统的决策问题。1989年提出了"从定性到定量的综合集成方法(Metasynthesis)",又称为综合集成技术或综合集成工程。1992年以来,钱学森院士又进一步提出了"从定性到定量综合集成研讨厅体系"和"大成智慧工程"的概念,开创了人机结合、人网结合,知识增长的新途径,进一步提高了人处理复杂系统决策问题的智能和智慧。这是钱老面对现代科学技术,特别是计算机技术及其相关信息技术的飞速进展,对航天系统实施"民主集中制制度"和"专家集体智慧决策方法"的科学总结与发展,进一步推动了系统工程理论与方法论的发展,为我们指明了科学决策的发展方向。

与国外的系统工程研究者不同,钱老坚定地信仰马克思主义哲学,用辩证唯物主义指导系统工程的研究与实践。他对毛主席的哲学著作、指导战争的理论与实践尤为重视,在形成系统工程理论的过程中,既融合了中国的传统文化,又集中了中国航天实践中的集体智慧。因此,钱学森与航天系统工程,不仅仅是钱学森,而是"钱学森加大家",是中国航天科技集体实践的智慧结晶。但是,诚如钱老明确指出的:"系统工程是技术,它只能在适当的社会制度和国家体制下发挥作用。建立这种制度和体制是生产关系和上层建筑问题,是系统工程的前提,没有这个前提,系统工程再好也无能为力"。因此,在总结我国航天系统工程经验时,我们要十分重视江泽民总书记强调指出的"技术、体制、理论创新"要紧密结合,"人才资源是第一资源的思想"。

参考文献

1 苗东升.钱学森与系统科学.中国工程科学,2001(8):1~6
2 郑敏哲主编.钱学森手稿.太原:山西教育出版社,2000
3 祁淑英,魏根发著.钱学森.保定:花山文艺出版社,1998
4 赵少奎,杨永太著.工程系统工程导论.北京:国防工业出版社,2000
5 钱学森等著.论系统工程.长沙:湖南科学技术出版社,1982
6 许国志,戴汝为,顾基发答记者问.面向21世纪的系统科学与工程.文汇报,2001-3-11
7 王寿云等.钱学森传略.《航天》,1992(1):2~7
8 胡士弘.钱学森.北京:中国青年出版社,1997
9 陶家渠.计划协调技术概说.系统工程与科学管理.国防科委情报所,1979.9
10 钱圣已.计划协调技术的探索与初步试验.系统工程与科学管理.国防科委情报所,1979.8
11 赵少奎.对我国工程科学技术发展的思考.中国工程科学,2001(3):22~30
12 (美)弗雷蒙 E.卡斯特,詹姆士 E.罗森茨威格主编.柴本良,华棣,李盛昌等译.科学、技术与管理

. 北京:国防工业出版社,1979
13 赵少奎 . 钱学森与中国航天科技事业 . 中国工程科学,2001(8):7~14
14 钱学森 . 一切成就归于党归于集体 . 光明日报,2001(1)

作者简介: 赵少奎(1940~) 哈尔滨军事工程学院六期毕业生,长期在运载火箭研究院总体设计部从事总体设计工作,1989年调入第二炮兵第四研究所。运载火箭研究院总体设计部工作期间(1964年4月~1989年12月):曾任我国自行研制的第一种弹道导弹主管总体设计师,定型试验队总体组组长;我国第一种洲际火箭的主管总体设计师、总体部若干专题研究负责人,在我国弹道导弹和运载火箭的研制过程中,参与了多项开创性工作,取得多项重大科技成果,立三等功两次。第二炮兵工作期间(1989年12月至今):曾任二炮四所某型号采办技术负责人,该型号定型试验队总体组负责人;总部某专项工程专题技术负责人;二炮科技委某方面发展战略研究课题组副组长等工作,获多项重大科技成果。主要著述:作为主要撰稿人完成了《航天技术概论》;作为第一作者完成了《工程系统工程导论》等著述,撰写并发表了60多篇学术论文、专题技术报告、专题编译报告和英、俄文译文。1992年获国家政府津贴,1995年任中国高科技产业化研究会海洋分会理事,学术委员会委员;1999年任中国高科技产业化研究会理事。

钱学森与系统论

苗 东 升

钱学森是少数特别重视哲学的科学家之一,不仅几十年来坚持学习哲学,坚持在科学研究和科技组织管理中自觉应用哲学,而且重视利用现代科学技术的新成果丰富和发展哲学。作为系统科学家,这后一方面的一个突出表现是他对系统论的探索,发表了很多深刻见解,并大力推动这方面的学术研究。在喜庆钱先生九十华诞之际,我们重温他的有关论述,就这个话题作一些回顾和评论,以图引出一些有助于把系统论研究向前推进的启示。

一、系统论的学科定位

作为一种现代科学文化思潮,诞生于20世纪40年代的系统研究,一开始就引起哲学界的极大关注,哲学家和有哲学爱好的系统科学家纷纷投入对当时那场遍及发达国家的系统运动,进行哲学反思。冯·贝塔朗菲具有浓厚的哲学兴趣,是最先对系统研究做哲学概括的系统科学家,也是西方最早提倡建立系统哲学的学者之一。控制论创立者维纳,信息论开创者之一的韦弗,运筹学家丘奇曼,都对各自的研究领域进行过哲学概括。在哲学家队伍中,拉兹洛的系统哲学,本格的系统主义,乌耶莫夫的参量系统理论,等等,都有重要影响。

在我国于20世纪70年代兴起、80年代达到高潮的那股“系统热”中,哲学家特别是自然辩证法学者是一支重要力量。钱学森是这场“系统热”最重要的推动者,他本人也常常谈论有关的哲学问题。部分由于哲学家们的理解片面和专业视野的局限,部分由于贝塔朗菲的《一般系统论》和维纳的《控制论》带有明显的哲学议论,以及信息问题本身有深刻的哲学意义,国内学术界在某种程度上倾向于把系统论、控制论和信息论看成哲学学说,把它们并列起来,简称为“三论”。由于这一称谓简明上口,符合中国人的语言习惯,很快就被学术界普遍接受,广泛流传。那时的中国到处都在谈“三论”,构成学术界的一道亮丽的景观。后来又进一步引出“新三论”的说法,也广为流传。这既反映出当时系统研究的兴旺发达,也反映了认识上的混乱。

钱学森旗帜鲜明地反对这种提法:第一,从学科命名规则看,如果按照出现的先后来划分新与旧,将来就会出现“新新三论”,“新新新三论”,等等,这只能造成混乱。第二,20世纪40年代出现的系统理论不只三个,如还有运筹学、博弈论等;20世纪60至70年代新出现的系统理论也不止三个,如模糊论、突变论、混沌论等,称“三论”是以偏概全。第三,

根本问题在于控制论和信息论不是哲学，而是具体科学，是技术科学层次上的两门关于系统的学问，与系统论不在一个层次。钱学森明确地把系统论归属于哲学理论，他所说的系统论既不是系统科学的具体理论，也不同于贝塔朗菲的一般系统论。钱学森反复论证哲学上“只有一论，即系统论”，主张“‘三论’的统一，统一在‘系统’”，并指出：“作为有很大成就的科学家维纳和香农，如果他们还活着，面对今天系统科学发展的情况，他们也会同意三归一，叫系统论”。

与国外学者比较，钱学森的独创性表现在他是从系统科学体系建设的角度考虑此一问题的，由此确定了系统论的学科性质和归属。按照他的现代科学技术体系学说，现代科学共有 11 个大部门，各有自己通向哲学的桥梁。这些桥梁都是哲学理论，但不是哲学的本体部分，而是某种哲学分论。桥梁者，两“岸”之间的联接部也。学科体系中的桥梁，一边联接的是可以实证的具体科学，包括工程技术、技术科学、基础科学三个层次；另一边联接的是思辨地建立起来的知识体系，即哲学。由此形成科学技术各部门共有的“三个层次一座桥梁” 的学科体系结构。11 个大部门有 11 座桥梁分别与哲学联接起来，即 11 种哲学分论，系统论是系统科学通向哲学的桥梁，是在马克思主义哲学总论下的哲学分论之一。

与西方从事系统科学哲学研究学者的一个原则区别是，钱学森明确肯定只有马克思主义哲学才是现代科学技术正确的哲学概括。就系统科学这个知识部门看，钱学森通过历史的考察，有力地印证了恩格斯的论断：近代科学的形而上学思维方式“堵塞了自己从了解部分到了解整体、到洞察普遍联系的道路”，从而抛弃了系统思想。依据马克思主义系统观的基本思想，钱学森进一步指出，到 19 世纪中叶，马克思恩格斯依据最新科学成就给系统概念以科学的阐释，完成了系统思想从经验到哲学、从思辨到定性的的发展。这也就为系统思想进一步从哲学到科学、从定性到定量的发展做好思想准备。

马克思主义哲学可以指导科学技术的发展，是我们长期强调的一个重要观点。但效果一直不理想，远不能同革命战争年代那样运用自如、卓有成效相比。究其原因，一个重要方面是我们忽略了不同科学部门的特殊矛盾或矛盾的特殊性，笼统地讲哲学的指导作用，似乎哲学对不同科学部门的指导作用完全一样，适用于社会科学的那些东西同样适用于自然科学，反之亦然。这也是一种形而上学，很容易把马克思主义哲学扭曲为教条主义。钱学森在哲学上的一个创举是揭露了这个弊病，把矛盾特殊性观点应用于此处，发现哲学虽然也有一些可以直接运用于所有科学部门的普适的思想、观点、方法，但大量的需要分别通过不同的桥梁来指导不同的科学部门 。例如，马克思主义哲学通过数学哲学指导数学，通过建筑哲学指导建筑科学，通过地理哲学指导地理科学，等等。没有这些桥梁，哲学一般原理对具体科学、具体工程实践的指导作用将受到很大的限制。系统科学通向哲学的桥梁是系统论，系统论从哲学上阐明了系统科学的特殊矛盾和矛盾特殊性，提出一套特殊的哲学观点和方法，因而“马克思主义哲学是通过这个桥梁来指导系统科学的工作”。系统论建立不起来，系统科学的发展将受到制约。这是他重视建立系统论的根本原因。

另一方面，我们以往也是笼而统之地提倡用科学技术的新成果来丰富和发展马克思主义哲学，没有区分不同科学部门的矛盾特殊性，因而效果也不理想。钱学森哲学创新的另一个表现在于，指出应当通过建立和发展不同的桥梁来发展马克思主义哲学：首先把每一门科学的成果概括抽象为相应的哲学分论即桥梁，然后再对这些桥梁做更高程度的哲学抽象。从科学层次经过一次抽象就上升到一般哲学层次的东西是有限的，大量的内容属于桥梁层次。例如，"系统科学实际得到的经验又概括总结起来，来深化发展马克思主义哲学，通过这个桥梁，这个桥梁就是系统科学的哲学"，而"系统科学的哲学概括，就是系统论"。要利用系统科学的成果发展哲学，应首先致力于建立和发展系统论，然后再考虑上升到马克思主义哲学本身。一般说来，这些观点也适用于其他 10 座桥梁。

有必要指出，在钱学森的用词中，早期对系统观和系统论不加区分，都指系统科学通向哲学的桥梁。但他后来对此有所修正，指出："如果说系统论是从系统科学到马克思主义哲学的桥梁，那么系统观就是马克思主义哲学的组成部分。"就是说，系统论是对应于系统科学的哲学分论，系统观则不是哲学分论，而是作为人类知识体系的最高层次——哲学的一部分，即在哲学物质观、时空观、运动观、规律观等等之外，还应有一个系统观。系统观就是哲学地阐述系统概念，哲学地阐述对系统的基本看法。笔者同意这个提法，认为把系统论和系统观作如此区分更能体现钱学森的学科体系观点。

二、如何建立系统论

就系统科学这一大部门看，自 20 世纪 80 年代以来，建立系统论也是钱学森格外关注的问题之一。他关于"尽早建立系统科学体系"的号召：第一是建立系统学，填补基础科学层次的空白；第二是建立系统论，填补桥梁层次的空白。但系统论至今尚未真正建立起来。作为系统科学体系中的必要组成部分，没有系统论意味着整个系统科学的体系尚未建立起来。这使他颇感焦急，一再鼓励学界同仁研究系统论："我们在中国要建立系统科学的这个体系，我们一定要建立系统科学的哲学概括。"他还从队伍组织方面做了一些推动工作，甚至多次呼吁哲学社会科学家"帮一手，把这个事带起来"。

对于如何建立系统论，钱学森一直在思考，提出许多建议。一个总的指导思想是："要建立哲学的概括，我建议从历史上来考察，只有一个办法。这个办法就是察看现在存在的各种各样的说法，吸取里面正确的东西。"在对系统科学做哲学概括方面，中国学术界也比国外同行晚相当一段时间，必须向人家学习。钱学森的学术思想一贯是开放的，在研究系统科学时一向重视从国外的各种流派中吸取营养，他也阅读过国外的系统哲学著作（乌耶莫夫、拉兹洛、本格等），视之为建立系统论的有用材料。

钱学森那一辈科学家大多都有比较深厚的国学修养。中国传统文化包含极其丰富的系统思想，被钱学森视为我们建立系统论的宝贵资源，也受到国外系统理论大家们的一致推崇。在这方面，钱学森考察过《易经》、《黄帝内经》等古代经典，阅读过熊十力等现代哲

学家的著作,从古代中国的工程建设、园林艺术等方面悟出许多精深的系统思想,加上他对毛泽东哲学思想的挚信和深入研究,从中寻找建立有中国特色的系统科学的思想营养,包括建立系统论这种有中国特色的系统科学哲学,提出许多很有见地的论述。

改革开放以来,拒绝向外国学习的极左思潮基本消除,但学术上的崇洋思想却在迅速泛滥,系统科学特别是系统哲学方面也有反映。钱学森最担心的是我们搞系统论的同志被西方学者牵着鼻子走,丧失独立思考的自觉性,充当西方系统哲学思想的简单传播者。所以,他多次以激烈的语言反对对外国人的学说、理论不作分析批判地照抄照搬,人云亦云,提倡采取列宁在《论战争唯物主义的意义》一文中倡导的那种科学的批判精神。钱学森自己在学术研究中始终坚持这个原则。他对国外学者的系统哲学研究的评价大多是贬义的,这既反映了他对这些著作的不满,更是对学术界某些崇洋思潮的抵制。孤立地看,他的有些说法似乎显得过于极端、片面;但只要放在特定的大环境下,就会理解他的警告是及时而深刻的。要建立钱学森提倡的系统论,首先要有理论创新的勇气,破除迷信,敢为世界之先。坦率地说,从自然科学到社会科学到新兴交叉科学、边缘科学,创新精神不足都是当前中国学术界的最大弊病。

1991年,钱学森在谈论从定性到定量综合集成法的工作过程必须"以《矛盾论》为指导思想"时说:"用以上观点看几本讲系统哲学的书,则都似差劲。将来我们的系统科学哲学概括,'系统论',可不要再犯此错误。"他所指的"错误"和"差劲"之处,首先在于这些作者轻视甚至拒绝马克思主义哲学的指导,常有唯心论和机械唯物论的东西。他一再告诫中国学者,我们要进行系统科学的哲学概括,要自觉克服唯心论和机械唯物论的误导,最重要的就是坚持马克思主义哲学的指导,尤其强调《实践论》和《矛盾论》的哲学思想的现实意义。这个思想在他的著述和通信中反复出现,可以说是"念念不忘"。

西方学者的系统哲学、系统主义哲学之类著作被钱学森视为"差劲"的方面,还在于它们很大程度上脱离系统科学的内容和前沿进展,思辨式地对各种系统现象进行哲学的分析概括,虽然丰富多彩,汪洋恣意,颇富吸引力,但科学基础薄弱,说它们是系统哲学不无道理,但很难称得上是系统科学的哲学概括。钱学森则强调必须基于系统科学的实际成果进行哲学概括,反对纯思辨地构造体系。他把系统论界定为"系统科学的哲学概括",甚至称为"系统科学哲学",意在突出这样一个唯物主义观点:只有先具备了有关的科学知识,然后才谈得上对科学进行哲学概括。1981年,他关于"第三个台阶,系统学还没有搞起来,就要跨第四步了。稳不稳啊?摔不摔跤子?"的发问,就是明证。当然,笔者此处并非认为西方的系统哲学一无是处;事实上,纯思辩的哲学概括也是必要的,常常也能提供一些深刻的智慧闪光,笔者就从这些哲学著作中获得了很多思想启迪。哲学不能总是跟在科学后面走,仅仅给科学提供论证,哲学还具有给科学提供前瞻性思想启迪的功能。我们在上面如此行文,用意在于阐明钱学森的学术思想,特别想弘扬他极力提倡中国人要勇于独立创新的精神。忽视这后一方面,完全跟着西方学者跑,以拉兹洛等人的著作为基础,是不可能建立起钱学森所提倡的系统论来的。

系统论的核心是阐述系统概念。西方学者往往把系统概念说成是20世纪40年代突然出现的新东西。钱学森明确反对这种说法。按照历史唯物论观点,任何一种科学思想的产生、发展都有其社会历史根据,必须同时具备客观的需要和可能,有其客观的规律性。在钱学森探讨系统论的文字中,一项重要内容是考察系统思想如何形成和演变。他以颇具说服力的文字描绘了“系统思想如何从经验到哲学到科学、从思辨到定性到定量的大致发展情况”,证明“辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其整体性的思想,也就是系统思想。系统思想是辩证唯物主义的内容”。这些工作不仅帮助我们正确理解系统思想及其演变的历史,而且提供了如何按照马克思主义哲学对系统科学进行哲学概括的榜样。

在钱学森的系统科学体系结构中,系统论介于系统学和哲学这两大层次之间。这可能会造成一种印象,似乎系统论只是系统学这个层次通向哲学的桥梁;因此,只需要对系统学进行哲学概括,就可以建立系统论。这是一种误解。系统论是整个系统科学通向哲学的桥梁,只有对系统科学三个层次的所有学科进行哲学概括,并且把系统科学这一大门类的科学技术作为一个整体进行哲学的解读和反思,才能完整地建立起系统论。用他的话来说:“系统论的产生需要概括整个系统科学的成果。”钱学森本人是这样宣传的,也是这样实践的,无论在谈论系统工程,还是谈论运筹学、控制论、信息论,或者在探讨系统学,特别是探索建立开放的复杂巨系统理论时,他都会抓住问题不失时机地进行哲学的思考、分析、概括,留下大量值得深入思考的见解。

三、系统论的构成分支

系统论作为一门学问,也是一种概念体系。在系统研究使用的概念中,凡具有哲学意义的都应当上升到系统论中。系统是整个系统科学的根本概念,也是系统论的根本概念。在把系统论与系统观当作同义词的早期,钱学森曾提出:“系统学的建立也会有助于明确系统的概念,即系统观。”粗略地说,钱学森意义上的系统论要求从哲学角度阐明系统概念,不妨称为系统概念论。同样,信息、控制、反馈、层次、涌现等,既是科学概念,也是哲学范畴,也应进入系统论,它们对于阐释系统这个根本概念是不可或缺的。

20世纪80年代,国内学术界已经认识到研究系统科学辩证法的重要性,发表了大量研究成果。但对于什么是系统科学辩证法,它与系统论的关系如何,歧见颇多。1984年,钱学森在一封信中指出:“系统科学辩证法实是我所说的从系统科学到马克思主义哲学的桥梁——系统论的一部分。我看其中的重要问题是结构与功能、还原论与整体论等辩证关系。”这段话蕴藏有极为丰富的内涵:第一,确认了“系统科学辩证法”这个概念;第二,明确了系统科学辩证法的学科归属,即属于系统论;第三,指明系统论包含不同部分或分支学科,系统科学辩证法只是其中之一;第四,提出了他对系统科学辩证法的基本内容和研究方法的看法。这些意见对于如何建立和发展系统论至今仍有重要的指导意义。

系统科学辩证法包括哪些内容?笔者认为,主要是阐明系统研究中涉及到的矛盾范

畴。对系统与非系统、系统与环境、部分与整体、微观与宏观、结构与功能、原因与结果、合作与竞争、有序与无序、信息与噪声、静态与动态、渐变与突变、稳定与不稳定、线性与非线性、确定与不确定、整合与解构、存在与演化等。系统科学的各个层次,各个学科,都积累了大量材料。钱学森的著述中对此有大量论述,既有科学层面的,也有哲学层面的,内容相当丰富。国外许多著名系统理论家的著述对这些矛盾范畴也多有涉及。这些都是建立系统论的原料或半成品,有待我们在辩证唯物主义指导下进行整理、加工、发挥,给以哲学的提炼,以形成理论体系,就可以初步建立起系统论的这个分支来。

除系统科学辩证法之外,系统论还有哪些分支?从迄今我们所掌握的资料看,钱学森的论著并未明确提出和讨论这个问题。但仔细研读他的著述还是可以找到明确的线索的。

钱学森依据现代物理学和宇宙学的最新成果认为,本体论已经不必要了。他说:"本体论是用思辨来讨论问题的,但是对客观世界本质的问题,本体论没有解决,现在科学可以解决了。"既然哲学主体部分都不必谈论本体问题,他要建立的作为哲学分论的系统论中无疑也没有系统本体论这个分支。当然,这只是钱学森的一家之言。贝塔朗菲就把系统本体论作为系统哲学的重要组成部分。笔者倾向于后者的看法,认为从系统的角度(观点)考察世界的本质问题,如系统的存在性与演化性问题,还是必要的。

钱学森的著作似乎没有使用过系统科学认识论这个词,但在他有关系统工程、运筹学、控制论、系统学、开放的复杂巨系统理论的论述中,经常谈论如何用马克思主义认识论指导系统科学研究。尤其在重点转向研究开放的复杂巨系统后,他经常在谈论科学技术问题时谈论认识论问题。因为对于开放的复杂巨系统问题,现在还没有可以应用的理论,对于人们依据经验研究和解决这种问题的方案、方法,特别需要从认识论上加以审查。钱学森也常常从认识论角度对系统科学成果做哲学概括,提出自己的认识论见解,有些显然超出了现有的认识论著作。所谓从定性到定量综合集成法,就是一个典型。按照他关于系统论的界定,这些内容理应属于系统论,构成系统科学认识论这个系统论分支。

钱学森的著述中谈论最多的是系统科学的研究方法和方法论问题,也使用过系统科学方法论这个词。系统科学方法论无疑是他所说的系统论的重要分支。作为一位有重大成就的科学家,在全方位地研究系统科学的过程中,钱学森自然十分重视方法论问题,而且也是他最擅长的方面。他的系统研究论著中包含大量关于系统科学方法论的内容,有很深入细致的论述。例如,从方法论角度区分简单性与复杂性,确认凡是不能用还原论方法解决的问题,都是复杂性。钱学森对还原论与整体论的优劣、利弊有许多辩证的比较和论述,特别是得出"系统论是整体论和还原论的辩证统一"这一总结论,有重大方法论意义。依据这个经典性命题对他的有关论述进行总结、提炼、发挥,吸收其他系统科学家的成果,就可以形成系统科学方法论的基本架构。

这样看来,钱学森的系统论至少包含系统科学辩证法、系统科学认识论和系统科学方法论三大分支,或者还应该包括系统概念论(如前所说,钱学森自己曾对系统概念做过哲

学分析，也评述过恩格斯对系统概念的辩证唯物主义分析）。我们认为，如果从系统概念的哲学分析入手，坚持以辩证唯物主义基本原理为指导，分别就这几个方面（分支）对系统科学的成果进行哲学概括，挖掘、提炼钱学森论著中有关这几个方面大量而分散的论述，就可以初步建立起钱学森所提倡的系统论。这是完成系统科学体系建设必要而且重要的工作。由于其内容相当丰富，需用专文来阐述，本文将不再涉足。

参考文献

1 冯贝塔朗菲著．林康义，魏宏森，等译．一般系统论——基础、发展和应用．北京：清华大学出版社，1987

2 钱学森．系统思想、系统科学和系统论．见：魏宏森主编．系统理论中的科学方法与哲学问题．北京：清华大学出版社，1984

3 马克思恩格斯选集第三卷．北京：人民出版社，1972

4 钱学森，等．论系统工程(增订本)．长沙：湖南科学技术出版社，1988

5 钱学森，等．用马克思主义哲学来指导系统科学的工作．系统工程的理论与实践，1992(5)

6 王寿云，等．开放的复杂巨系统．杭州：浙江科学技术出版社，1996

7 钱学森致黄鳞雏的信．见：汪应洛，黄鳞雏主编．系统思想与科学技术发展战略研究．西安：西安交通大学出版社，1985

8 钱学森．人体科学与当代科学技术发展纵横观．北京：人民出版社，1996

作者简介：苗东升 教授。1937年10月出生，山西榆社县人。1960年3月毕业于北京师范大学数学系，分配到航天科技系统工作。1979年底调入中国人民大学哲学系，主要讲授高等数学、系统科学和系统思维，主要从事系统科学及其哲学问题的研究。主要著作有《模糊学导引》、《系统科学原理》、《浑沌学纵横论》(合)、《系统科学精要》、《系统科学辩证法》等。

钱学森先生与我国的空间科学和应用

刘振兴

2001年12月11日，是当代杰出的应用力学、航天技术和系统工程科学家钱学森先生90周年寿辰。钱先生为我国科学技术，特别是空间科技事业的发展做出了巨大贡献，他是我国科技工作者学习的楷模。钱先生在担任“581”组组长和七机部五院院长期间，非常重视和支持我国空间科学与应用研究，对推动这一领域的发展做出了重大贡献。我作为钱先生间接的学生，值先生90寿辰之际，通过自己亲身经历的几个片段，回顾他勇于开拓创新的学术思想和卓著的科学贡献。

一、我第一次聆听钱先生的报告——用辩证唯物论指导科研

1955年9月，我从南京大学毕业后被分配到中国科学院地球物理所工作。到所后，第一个使我振奋的消息是我国著名科学家钱学森先生很快就要回到祖国。1955年10月，中国科学院的副秘书长专程到广州迎接钱先生，并陪他一起到达北京。时隔不到一个月，即1955年11月，中国科学院组织召开了一次钱学森先生报告会，地址是在当时的政协礼堂。我参加了这次报告会。作为一个刚毕业不到两个月的大学生，能参加钱先生的报告会，内心感到无比的高兴和荣幸。记得钱先生报告的主题是关于用辩证唯物论指导科研工作的问题。他在报告中谦虚地说：我在美国从事科研工作20多年，从科研工作中不断积累和认真总结出来的经验和科研方法，自感是行之有效的一套方法。回国后学习了有关辩证唯物论和历史唯物论方面的著作及毛主席的《实践论》和《矛盾论》，才恍然大悟，感到自己总结出来的那套科研方法，在马克斯、恩格斯和毛主席的著作中都已阐述得很清楚了。从钱先生生动和精辟的报告中，我深刻地认识到先生具有的一些崇高精神，这就是：不惧美国百般阻挠，坚决回国献身祖国科技事业的爱国主义精神；努力学习马列主义和毛泽东思想，自觉改造世界观和人生观的精神；自觉运用辩证唯物论指导科研、勇于开拓和创造的精神。这些对我以后在科学精神、科研思想和科研方法方面产生了深远的影响。

二、钱先生开拓的稀薄气体动力学

钱先生开拓的稀薄气体动力学，不但为研究高速飞行体（如火箭、导弹和卫星等）在高空稀薄气体中运动的动力学和热力学过程奠定了理论和风洞实验基础，而且对利用火箭和卫星探测高空大气参数的数据处理方法方面提供了理论基础。

1958年,毛泽东主席在中共八届二次会议上谈到“我们也要搞人造卫星”。1958年7~8月间,中国科学院成立了“581”组,开始研究我国的卫星问题,钱先生为组长,赵九章先生为副组长。根据我国当时的国情,发射卫星的条件尚未具备。1958年底,中国科学院根据中央关于卫星工作的批示精神,提出“大腿变小腿,卫星变探空”的任务调整部署,决定先开展火箭探空,进行高空大气探测,以此为发展卫星建立基础。1959年,中国科学院“581”组正式开始了利用火箭探测大气压力和温度数据处理方法的预先研究。这项工作需要一些过去未学过的基础知识,如分子运动论和稀薄气体动力学等。在这期间,根据工作需要我第一次阅读了钱先生1946年发表的关于稀薄气体力学开创性的论文,为火箭探测高空大气压力和温度数据处理打下了基础,并写出了高空大气压力和温度数据处理方案。

1958~1960年期间,我正在准备中国科学院副博士研究生学位论文。因我在大学期间学的是气象专业,开始时选的研究方向是近地层大气物理,学位论文题目是近地层大气湍流。1959年3月,由于工作需要我被调到“581”组,专业改为高空大气物理,学位论文的题目也相应地改变。学习了钱先生关于稀薄气体动力学的论文后,我对稀薄气体动力学产生了浓厚的兴趣。我想用稀薄气体动力学的方法,研究流星在高层大气运动中的动力学和热力学过程,间接测算高空大气密度和温度。将这种想法与我的导师赵九章先生进行了讨论,他非常同意和支持这种想法。1961年初我完成了学位论文,在学位论文答辩会上,我国著名力学家郭永怀先生对此论文给予好评。稀薄气体动力学和气体分子运动论的学习和研究,为我以后研究空间物理和空间等离子体问题开扩了思路,打下了基础。

三、做保障航天活动的“红色预报员”

1970年以后,我所在的七机部五院505所(空间物理和探测研究所),直接受钱先生的领导,因他当时担任七机部五院院长。早在1971年他就提出,你们505所的主要任务是做保障航天活动的“红色预报员”。他指出,航空需要天气预报,卫星在空间环境中运行,为了保证卫星系统的安全,必须对空间环境进行探测和预报。

根据钱先生的批示,我国太阳物理和空间物理界开始了空间环境预报和研究工作,内容包括太阳活动预报、地磁活动预报和电离层扰动预报等。事实证明,钱先生的这种指导思想是非常正确的。

地球空间环境包括地球磁层、电离层和中高层大气,是各种应用卫星、载人飞船运行和空间军事活动的主要区域。地球空间环境直接受太阳活动和行星际扰动的影响,经常发生一些爆发性的活动,可将这些爆发事件统称为地球空间暴,包括磁层亚暴、磁暴、磁层粒子暴、电离层暴和热层暴。这些空间暴可引起地球空间环境(包括磁层、电离层和中高层大气)的剧烈变化,直接影响各种飞行器系统、宇航员的安全、通信系统的效能及飞行器轨道及导航和定位的精度等,强的空间暴甚至可使飞行器系统失灵。大量统计结果表明,

由于空间环境剧变引起的飞行器故障,约占飞行器故障的1/3。为了保证上述航天活动的安全,必须开展空间环境预报。

钱先生提出的“红色预报员”口号,推动了我国空间环境预报研究的发展,目前中国科学院空间中心已成立了为航天活动服务的空间环境监测和预报中心。

四、钱先生最早提出“空间气象”的概念

在提出“红色预报员”思想的基础上,1976年在北京召开的空间物理学术研讨会上,钱先生又首次提出了“天象”的概念。当时他说的“天”,是指空间或太空,“天象”即是空间气象的意思。到了20世纪80年代,国际上曾提出过“空间天气”和“空间气候”的名词。这里所说的“空间天气”是指空间现象的短时间变化;“空间气候”是指空间现象长期的统计性变化。

直到1994年,美国才正式提出了美国国家空间天气计划。在美国的空间天气计划中,对“空间天气”一词是这样定义的:空间天气指的是太阳、太阳风、磁层、电离层和热层的状况,它可影响天基和地基技术系统的运行和可靠性,危及人类的健康和生命。恶劣的空间环境会引起卫星运行、通讯、导航和输电网的事故,造成社会经济损失。

1997年,美国又提出了空间天气计划的执行计划。由于空间天气研究和预报对天基和地基技术系统及对人类生存环境的重要性,目前世界各空间国家对空间天气的研究和预报都十分重视,先后制定了各自的空间天气计划。我国航天界和空间物理界对空间天气研究和预报工作也十分重视,由中国国家自然科学基金委牵头,正在制定中国的空间天气计划。

钱先生提出的“空间气象”想法,比美国空间天气计划的想法早两个年代,钱先生是20世纪70年代提出的,而美国的空间天气计划是20世纪90年代提出的。由此可以看出,钱先生在科学思想方面的远见卓识。

五、重视空间环境对航天活动的影响

钱先生非常重视空间环境对航天活动的影响。在他担任七机部五院院长期间,就十分重视卫星元器件的空间环境地面模拟试验,同时他还非常重视由空间环境所引起的卫星故障。他在百忙中,亲自查阅空间环境引起卫星故障方面的文章。早在1972年,钱先生就注意到卫星表面带电引起的卫星故障。他对这种故障十分重视,立即批示五院505所对这种故障进行研究。根据钱先生的批示,505所立即开展了这项工作。当时这方面的研究在国外也刚开始。我承担了这一任务,开始进行文献调研和分析研究工作。分析和研究结果表明,卫星表面带电是由磁层亚暴向内注入的热等离子体引起的。在背阳面的同步高度区,当强磁层亚暴时,可使卫星表面带高达万伏的负电位,致使卫星发生故障甚而失灵。当时对磁层亚暴几乎是一无所知,我对磁层亚暴的学习和研究,是从承担钱先生提出

这项任务时才开始的。通过两年的学习和分析研究,我对磁层亚暴的出现及其对卫星带电的影响和带电机理有了较系统的了解,写出了研究报告。在此基础上,505 所在我国首次设计出了测量卫星电位的仪器,为在卫星上进行卫星电位测量打下了基础。在 1994 年发射的"实践 4 号"卫星和 1999 年发射的"实践 5 号"卫星上,都载有中国科学院空间中心研制的卫星电位探测器,取得了一些有用的科学数据,对分析卫星带电引起的故障发挥了重要作用。为了保障卫星运行的安全,只知道卫星带电原因和机理是不够的,重要的是如何消除卫星的电位。在过去工作的基础上,1997 年我提出一项研制电位主动控制的"863"项目,被专家评审通过。通过两年的实验研究,研制出了一套控制卫星负电位的样机,并通过了专家委员会的验收评审。这项研究,为我国今后在卫星上进行卫星表面电位控制打下了基础。

另外,钱先生还非常重视空间物理研究对国防现代化建设的作用。早在 1963 年,他就提出了防御导弹袭击的想法,并布置了这项研究任务。远程导弹的高度范围可达3 000km,空间环境的背景,如光学背景、辐射背景和各种波段的波动背景等,对识别导弹起着重要作用。因此要进行反导,首先要全面了解空间环境背景和变化情况,为分辨导弹运行中各个阶段的特征与空间背景的差异提供数据和分辨方法。根据钱先生的布置,当时的中国科学院应用地球物理研究所承担空间环境方面的任务,我参加了这项研究工作。

在钱先生的热情指导及积极支持和推动下,近年来我国的空间科学和应用事业有了迅速的发展。在 2000 年 11 月我国政府第一次向国内外发布的"航天白皮书"中,明确地将空间技术、空间应用和空间科学作为我国航天事业的主要内容,钱先生对这三个领域的发展都做出了重大贡献。

值钱先生 90 寿辰之际,祝先生健康长寿,让我们共同学习他热爱祖国、献身科学事业的精神,孜孜不倦的探索和创新精神,为迅速发展我国的科技事业和社会主义建设做出应有的贡献。

作者简介:刘振兴　山东省昌乐县人。中国科学院院士。1955 年毕业于南京大学气象系,1961 年中国科学院副博士研究生毕业,获副博士学位。现为中国科学院空间科学与应用研究中心研究员、博士生导师、中国 Cluster 数据和研究中心主任,中国地球空间双星探测计划首席科学家,欧空局 Cluster 科学数据系统指导委员会委员,国际地磁和高空物理协会(IAGA)中国委员会主席。长期从事空间物理研究,先后从事近地层大气物理、高空大气物理、行星际物理和磁层物理研究,在国内外刊物上发表论文 120 余篇,合作编著书 6 部。曾获国家级奖 5 项,省部级奖 3 项,并获 2000 年国际空间委员会(COSPAR)和印度空间组织联合颁发的 2000 Vikram Sarabhai 奖。

严密的组织　瞻前的谋略

——中国导弹、卫星的先驱者钱学森

陶家渠

1948年,祖国解放事业胜利在望,已成为国际知名学者的钱学森,以其崇高的民族气节,认为学成回国报效祖国的时机已到,相继辞退了在美国空军、海军的职务,准备回国参加新中国的建设。但是,竟遭到了美国政府的种种迫害和阻挠,长达五年。他矢志不移,最后巧妙地摆脱特务监视,捎信祖国请求帮助。周总理得知后,当即授意与美方在中美大使级会谈中交涉。这样,钱学森终于在1955年10月离美回国。

回国后,党和政府让他先赴各地看看。在哈尔滨参观中国人民解放军军事工程学院时,院长陈赓大将一见面,问他的第一句话就是"中国人搞导弹行不行?"他作了肯定的回答。

1956年春,毛主席接见了钱学森。随后在周总理鼓励下,他写了意见书,提出了我国火箭、导弹事业的组建草案、发展计划和具体步骤。意见书得到了中央的重视,中央立即决定成立国防部导弹研究院(五院),任命钱学森担任院长。从此,他在周总理和聂荣臻元帅的直接领导下,开始了中国航天事业的创建工作。

如今,中国航天事业已跻身世界先进行列。

在即将迎来钱老九十寿辰之际,回忆起在钱老领导下,中国航天事业是怎样走出了一条中国自己发展的又快又好又非常省钱的道路之时,我脑海里又时时浮现出30年前,当钱老离开七机部赴国防科委任副主任时,曾专门回来嘱咐我的话:"你要把我们这些年发展航天的这套做法,告诉给后面来的人。"我还想起1989年时,钱老曾经说过:"现在(我国)某些方面赶不上去,不是因为中国人笨,而是我们缺乏严密的组织,没有更好地把人的积极性发挥出来"。需要有"科学技术战略家",做出"选择干什么、不干什么、怎么干"的正确决策。出的主意正确与否,事关重大,"出的主意要是差一点,国家的损失就大了。"所以,如果能尽力试试,把钱老呕心沥血领导航天事业中的严密组织、瞻前谋略的许多成功做法,较好地概括表述出来,也许是庆贺钱老九十寿辰该做的事!

一、紧紧依靠党的领导和国家的支持

建院之初,党中央、国务院决定全国"开绿灯",全力支持五院。

五院党委遵照聂帅指示:"在科学技术问题上,钱学森说了算"。其他方方面面的工作

都围绕“搞出导弹”这个中心分头负责。聂帅自己也宣布要当好后勤部长。

钱老带领全院坚决遵循经毛主席批准的“自力更生为主,力争外援和利用资本主义国家已有的科学成果”的建院方针去创建。

由钱老决策的所有重大问题,都严格提交党委讨论通过,更大的问题报请中央决策。如20世纪60年代初,国家经济遇到了很大的困难,五院工作也做了压缩调整,但中央决策“两弹为主,导弹第一”的决策,则极大地支持了航天事业的发展。

二、自力更生为主

1956、1957年建院之初,西方封锁,苏联也认为我国太落后,不希望我们设计生产导弹,所以我们必需自力更生。全院除钱老外,谁也没见过导弹,为此钱老带头讲授“导弹概论”等许多课程。国外出版的导弹火箭书籍,专业名词都经他一一推敲给出译法。他提议成立作战研究处,研究各类导弹指标体系,请科学院、高校专家共商研制方案。许多技术骨干在他提名下,投身于航天事业的研究岗位和各级领导岗位。

1958年苏联答应我国仿制苏制的几种近程导弹,但设计资料一概不给。钱学森便引导大家开展“反设计”,从分析苏制导弹的使用性能中,去揣测人家的设计方法,以达到我国自行掌握这些导弹的全部设计技术。同时,他不迷信苏联,仍继续投入高水平人才,坚持自力更生为主,探索中国自己独立发展的捷径,开展了诸多导弹的自行设计工作。

1960年,中苏关系破裂,我们以卧薪尝胆,发愤图强,以报国耻之斗志,继续走自己的路。

我们没有步外国航天工业发展道路的后尘,我们也不迷信外国失败之禁区,经过充分论证,走出了一条适合中国需要的、又快又好的非常省钱的道路。

三、走群众路线,寻求中国自己的技术发展途径

钱老比谁都清楚中国很穷,经济力量很薄弱,工业基础很落后。因此,怎么最大限度地节约经费,不辜负党中央和全国人民的厚望,走中国自己的道路,研制生产出符合中国国家战略、有自己特色的先进武器是最最重要的事情。为此,他全身心地投入到对如何走中国导弹发展道路的研究中。

在导弹研究领域,钱老是大家公认的首屈一指的行家。他在应用力学、空气动力学、固体力学、火箭技术、喷气推进、弹道理论、自动导航、工程控制论、物理力学等众多涉及导弹的重要专业领域里都有杰出贡献。对中国航天事业怎么发展,他有自己的想法;他有许多规划性经验公式和曲线,掌握了一套从大处远处设想科技发展的方法。但他总是强调导弹是个大系统工程,所需专业知识很广,一定要大家一起集思广益。他要求大家认真研究分析国外的各种道路、想法、报道的真伪,不要盲从照搬;他号召大家“海阔天空”敞开思路,有创意有预见地提出中国自己应怎么发展,回答中国航天“干什么,不干什么,怎么干”

的问题 。

钱老不仅做面上布置,还有步骤地一个专题一个专题地深入到基层进行指导并与大家讨论。为了使技术路线讨论研究得更深透更无拘束,他开创了星期天下午在他家的工作室开“专家讨论”例会,对不同命题,请相应专业的专家来共同商讨。讨论的问题有“导弹系列化模块化专题”、“发动机推进剂走什么道路”、“发动机方案及其原理性验证试验”、“惯性制导的道路”、“地面计算机升为弹上计算机”等等问题,讨论是畅所欲言的。“议定的事要执行;发现差错则要尽快改正”。如发动机及推进剂的选择是当时苏联人的禁区,燃烧不稳定问题是国际上的难题,但我们解决了。如研究采用什么惯性器件的会上,大家甚至连蜜蜂在空中停留的原理都议论到,但由于当时电子元器件体积重量太大而不可接受。随后事隔多年,由于半导体技术的突飞猛进,钱老又提出再讨论等等。

这种集思广益、充分发扬民主的方法,是卓有成效的,它对指导中国航天事业的发展起着重大作用。事实上按此做出的发动机、国产集成电路的微计算机等,与当时世界水平相比并不逊色。

钱老不但信任年长的专家,也放手让年轻人发挥他们的聪明才智。例如,对于海防导弹的技术发展途径,他在听取年轻人意见后,让其执笔起草。我国自行研制可打高空高速飞机的地空导弹需要靶机,国外原本同意出口,但后来又不答应了。在此关键时刻,年轻人提出自行研制一种飞得更快、又便宜的靶弹来代替靶机的建议,钱老给予全力支持,要他们带着初步设计的方案去征求导弹试验靶场同志的意见,然后组织力量研制。

在专家们初步统一了对“各类导弹技术发展途径的战略目标”认识之后,钱老还坚持发动更多的骨干群众来进一步充分讨论,以求更加充实完善,并且统一职工的思想、振奋精神,以便在党中央批准后,持之以恒地向既定目标干下去。实践证明,钱老始终坚持走群众路线,坚持“领导、专家、群众相结合”的技术民主集中制原则。从战略上,为我国航天事业发展走对路子,省人、省时、省下了大量经费。

四、不断了解和发现人才、培养人才,选好各类专业的带头人

航天事业需要成百的各类专业带头人。一把钥匙开一把锁。身负领导重任的钱老,把选好各类专业的带头人视为头等重要的工作。

钱老用了很多精力,找各类专家谈话,讨论相关的科学技术问题,从中了解对方的想法、兴趣、专长和基础底子。他还要求身边的助手努力钻研和拓宽专业知识,也要通过技术讨论的方式,了解领导层技术骨干、年轻骨干的想法、兴趣、专长,乃至数学英语等基本功。并规定每双周周五下午向他汇报各种战略发展思想和骨干人才状况,并敞开思路讨论。

钱老不仅注重关心和培养各类专业的带头人和年轻“尖子”,更重视导弹设计师队伍的建设,特别是领头人和领导班子的专业结构及其技术思路;考察其能否抓住该导弹系统

的主要矛盾,以及是否具备更多的解决主要矛盾的技能。对不适应的,经过深思熟虑后,就果断提请党委决策,从组织上加以调整,以适应“经济基础”,并指定专人以理服人加以贯彻。

五、领导者永远走在科技发展的最前沿

解决了一个主要矛盾,再去解决下一个新的主要矛盾,一浪一浪地推进中国航天事业向前发展,是钱学森领导的才能和艺术。作为一位领导者,他始终走在中国航天科技发展的最前沿。他在领导大家制定了导弹技术发展途径后,就集中精力去超前研究洲际导弹弹头再入的防热问题。在这个问题有了解决方案和措施后,他又去领导研究导弹突防的问题了……

1958年,我国导弹研制工作展开后,兼任中国科学院力学所所长的钱老向中国科学院建议开展卫星的研究。为此,中国科学院成立了以他为组长的领导小组,负责筹建。1961年,在钱学森、赵九章的倡导下,举办了12次星际航行座谈会,制定了规划,安排了预先研究。1965年,他建议人造卫星列入国家任务,而此刻他已经将运载火箭的研制任务与导弹研制任务做了统一的前瞻性安排了。他领导着大家相继攻克了卫星和运载火箭中的一个又一个关键技术,如1966年对运载火箭滑行段喷管控制的难题,他亲自提出了解决意见等等。“文化大革命”期间,领导干部几乎都被“打倒”了,全面工作都靠钱老一手直接组织指挥,他排除万难终于使我国第一颗卫星上了天。

1964年,毛主席指示搞反导弹任务后,他又一次走在科技发展的最前沿。

六、不断研究和采取科学的管理

1961年底,在导弹的技术途径基本明确、对科研队伍做出调整安排之后,钱老说“我现在‘改行’研究科学管理了”。

为了改变1958年大跃进中带来的“边研究边设计边生产边试验边定型”的头脑发热局面,钱学森带着身边的同志集中精力研究导弹武器管理的核心——“研制程序”。在研究分析了美国人、苏联人的导弹研制步骤之后,他强调从中国自己的情况出发,遵循辩证唯物论和认识论的规律来研究导弹研制程序的规律。如“对不认识的关键技术,应先投入少量经费攻克之;对有把握较成熟的技术项目,则应挪后展开”……从而 ,提出了中国导弹的“研制八大阶段”和超前开展的“预先研究”等概念和内涵;制定了法规性“条例”,以规范全院职工的行为。为了充分听取广大骨干职工的意见,统一大家对科学管理的认识,把文稿印发人手一册,请大家参加讨论,人人动手修改一份,并阐明修改理由。修改的意见汇集在一起有2m之厚。经过逐条逐句分析研究,提出取舍的解释,最终形成了“五院根本大法(七十条)”加以贯彻。现今世上有ISO-9000。我们早在此前就有一个类似的章法。正是这样的科学管理,大大加快了导弹研制的进程。

年轻人从国外资料中看到美国“北极星”导弹由于采用PERT技术(我们叫计划协调技术),可以按时完成导弹研制任务。钱老就要求他们提出研究报告,并提交党委通过,亲自动员试点。试点成功后,又要求在全航天工业系统推广。后来由于“文化大革命”搁浅了。十一届三中全会后,钱老又立即要求将之开展起来,对导弹、卫星和运载火箭的科学计划与调度决策起到了重要作用,保证了洲际导弹等的按时发射和定型。

钱老对技术管理部门的要求是很严格的,标准也是很高的。首先要他们善于“出主意和用人才”。他反复强调机关不能“人云亦云、不懂装懂,要有自己的创造性见解”。譬如,机关同志在阅读前苏联为我们编制的基本建设规划资料中,发现资料中曾提到“抗干扰研究室”几个字样,但以后的资料中却只字未提,为此提出了一份《开展我国导弹抗干扰研究的建议报告》。钱老立即责成机关落实,定期向他报告进展,这为后来我国地空导弹击落敌机打下了基础。例如在论证导弹战术技术指标与方案过程中,基层通常会有多种不同的设想,钱老总是要求机关从技术上阐明理由,提出自己的分析和看法,许多意见经他权衡后采纳。

七、倡导十分严谨的科学作风和勤俭节约的风尚

钱老的科学作风是非常严谨的。与他谈话、向他汇报工作的同志,如果对某一问题用“大概”、“可能”的字眼去阐述,是不能搪塞过关的,将会受到他反问式的批评:“你是科技工作者?!”、“没有把握的问题,有几分主观臆测的含义”,都是不允许拿到桌面上浪费时间的。

钱老号召大家学习德国“终身科学家”那种严谨的科学作风,把基理彻底搞懂的钻研精神;他反对“小陋匠”作风。

钱老的个人生活是非常俭朴的。他心中更关心的是如何在技术上做到用最少的钱来发展航天事业。导弹定型的打靶发数,美国、前苏联每种型号都要打掉近百发,耗资巨大。钱老要求加强科学研究,做到有根有据地、最大限度地减少打靶数量。他强调全力开展模拟打靶工作并亲自指导其开展;同时还专门调请了统计数学的教授来领导试验方法的理论研究。终于以非常少的发数达到了目的,为国家节省了大量经费,使部队早日得到装备。

八、充分依靠全国的支持

为发展中国的航天事业,钱老放眼全国,非常注意依靠和调动全国优秀的力量。

从中国科学院、高校到冶金、化工、建材、纺织、铁道、教育、几个机械部等等,他都请求大家支持帮助,和他们一起商量发展的技术途径。他善于科学地把基础研究、应用研究、工程开发预先研究、产品研制、批量生产有机地衔接起来,通过严密的组织发挥各自优势,避免重复劳动,形成国家的航天科技工业系统工程体系。

为了自行研制中远程导弹，需要高性能的靶场光测设备，钱老请中国科学院牵头，建议国家组织队伍攻关。为协调该工程的指标进度，将办公室设在五院，由他亲自指导。后来国际上激光等新技术发展很快，这种有效的组织领导形式，便面向越来越多的专项任务，而且还扩大到许多工业部门。如为发展我国完全由自己探索研究的固体火箭，钱老请机械部研制固体推进剂的搅拌机，研制大直径发动机端盖成形设备等等。

对于全国各部门的大力协同，钱老始终十分感激。他也常常为承担航天任务的工厂研究所着想，为他们得益有限而不安。

钱学森同志以其严密的科学组织、瞻前的技术谋略，呕心沥血，为开创和发展中国航天事业，立下了丰功伟绩，树立了光辉的榜样；也为发展我国的高科技提供了宝贵的经验。

参考文献

1 国务院、中央军委关于授予钱学森同志“国家杰出贡献科学家”荣誉称号的命令 .1991 - 10 - 14

2 江泽民 . 在授予钱学森同志“国家杰出贡献科学家”荣誉称号仪式上的讲话 .1991 - 10 - 16

3 钱学森 . 一切成就归于党归于集体 . 人民日报，1989 - 9 - 8

4 王寿云 . 钱学森传略 . 人民日报，1991 - 10 - 28

作者简介：陶家渠 1937 年 11 月 3 日出生。1960 年 3 月北京理工大学无线电系雷达专业毕业，分配到国防部第五研究院，在钱学森同志身边任学术秘书。先后任七机部科研设计局的组长，航天部预先研究局、科研生产局正副处长、正副总工程师，中国航空航天部科技司副司长，中国航天工业总公司中国航天电子基础技术研究院院长，七机部科学技术委员会专业组副组长，中国系统工程学会理事，中国计算机自动测量与控制技术协会副理事长兼秘书长，中国宇航学会常务理事。长期从事导弹、卫星、运载火箭、航天电子等中国航天科技工业的发展战略研究，从事航天超前发展所需的预先研究、研制工作的总体组织、技术攻关和科学管理的具体领导工作。

回忆钱老在我国导弹事业创建初期的二三事

梁思礼

1955年,科技界的巨匠钱学森教授历经磨难和曲折,终于踏上了新中国的大地,回到了祖国母亲的怀抱。光阴荏苒,转瞬46年已经过去了,他凭借自己渊博的学识、远见卓识的韬略和坚信"中国人能行"的信心,为中国导弹与航天事业的创建和发展做出了不可替代的卓著的贡献。抚今追昔,回忆钱老在我国导弹事业创建初期的几件往事,旨在颂扬钱老的伟大品格和高超的学术技术见解,并借此机会祝贺钱老九十寿辰。

一、矢志不移,坚信中国人能杀出一条血路来

1962年3月21日,我国自行研制的第一枚液体中近程弹道导弹进行首次飞行试验,起飞后18秒发动机起火,21秒导弹失控,坠毁于发射台前68m、偏左660m处,随着轰的一声巨响,在戈壁滩上炸出了一个大弹坑。首次的失利对热情高涨的广大科技人员确实是当头一棒,他们大为震惊,深感痛惜,顿觉压力重大。尽管聂荣臻副总理一再安慰大家:既然是试验就有失败的可能,吃一堑长一智,要总结经验教训,以利再战。并指示各级领导,不要追查责任,重要的是找出失败的原因。但这支年青的导弹队伍一时还难以摆脱沉痛的氛围,其中个别人也难免有畏难情绪,甚至是信心不足。身为技术指挥员的钱老此时的镇定和信心无疑至关重要,他夜以继日地领导着故障分析工作。虽已年过半百,但仍精力充沛、思维敏捷,深入到科研生产第一线。我当时在国防部第五研究院二分院第一设计部(现十二所)工作,钱老基本上是每周来十二所一次,除组织故障分析,布置开展多种技术方案的分析、论证,动员开展预先研究外,给我印象最深刻也是感触最大的就是钱老坚韧不拔的毅力与必胜的信心。他一再开导大家,我们是白手起家,创业维艰,但我们不能向困难低头,只要大家认真对待,就没有攀登不上去的高峰,就没有克服不了的困难。他还铿锵而激动地讲:"我们要杀出一条血路来,搞出我们自己的导弹,就是导弹没有尾翼像一支铅笔那样,你们也要能很好地控制住它。"时至今日,40多年过去了,钱老激昂而洪亮的讲话还仿佛仍在我耳边回荡。从一定意义上讲,中国航天事业所取得的举世瞩目的成就,就是靠这种必胜的信心才"杀出了一条血路",奋勇向前。

二、立足系统与全局,寻求系统的整体优化与协调

我国自行研制的中近程导弹第一次飞行试验失败是坏事,但查出了故障原因,总结出

了经验教训,坏事就变成了好事,而且长期受益。当时总结的经验教训之一,就是必须重视总体和分系统的综合分析与设计,即是现在所称的系统工程的观点。在这方面钱老称得上是先导和楷模。总结了第一次飞行试验失败的经验后,他亲自指定孙家栋和我去向当时国防科委的各研究院所的技术领导去宣讲总体和系统综合设计的思想。讲述导弹是一个有机的整体,是一个系统,各分系统设计得再好、再完美,如果缺乏整体系统设计,整个系统也不一定是成功的。钱老倡导的这一系统工程方法,在后来的研制工作中得到了贯彻落实,广大科技人员认识到导弹研制工作的综合性与复杂性,总体与分系统之间,各分系统之间都存在着内在的联系,牵一发而动全局,各分系统的仪器设备之间,甚至零部件、元器件之间的关系也是如此。加强型号总体设计,寻求型号整体的优化和做好型号研制中的技术协调,越来越被广大科技人员所重视。这也是保证型号研制工作正常进行的经验之一。

与此同时,钱老还根据他早年对运筹学的研究,最先将美国海军特种计划局在1958年研制北极星导弹时所运用的计划评审技术(PERT)引用到我国导弹研制的管理之中,编制计划流程网络图,以此进行指挥调度。后经不断地改进、完善,逐步形成了航天系统工程管理的理论和方法。对这方面的倡导和实施,钱老是功不可没,贡献卓著。

三、思维敏捷,在领导科技工作中颇具前瞻性和开拓性

凡是和钱老接触过或者得到他指教的人,都十分敬佩他思维敏捷,学识渊博,在把握科技发展方向上有很强的前瞻性和预测性。我国自行研制的中近程导弹首次飞行试验失败后,他更加注重预先研究工作,亲自到控制系统研究所布置预先研究工作,要求做好多种技术方案的分析论证和比较工作。正是由于他的倡导和要求,当时的控制系统研究所(十二所)组织了精兵强将,如林金、宗绍禄、吴美蓉、贺麓成等人,开展方案预研工作。他们先后进行了横向采用坐标转换、纵向采用双补偿的全惯性捷联式制导系统,横向陀螺背表系统,变参数线性系统外干扰的全补偿方案等的研究,并取得了突破。正是由于取得了这些预研成果,才保证了由中近程导弹的无线电横偏校正系统和惯性混合制导改为全惯性制导、中程导弹以及后续弹道导弹研制工作的顺利进行。这些都与钱老十分重视抓预先研究密不可分。

此外,钱老能及时发现科技人员中的创新思想,以科学的态度给予支持与指导。1971年,在进行远程弹道导弹第一发飞行试验的发射现场,弹载计算机的主要设计者沈绪榜同志向钱老提出了使用弹载计算机来测试控制系统的想法。钱老详细听取了沈绪榜同志关于使用弹载计算机对整个控制系统进行测试的设想,听过汇报后,他当即决定将这个任务交给了负责控制系统的十二所和沈绪榜同志所在的771所,要求在远程弹道导弹的02批中实现。后经771所沈绪榜和十二所孙凝生等同志共同努力,这一测试方案获得了成功,并用于“长征2号”运载火箭上。这一方案的实施开创了我国弹道导弹与运载火箭采用计

算机自动化测试的先河。

回顾既往，喜见我国航天事业的辉煌成就，展望我国航天事业的光明前途，更加敬仰钱老的丰功伟绩。我所回忆的早期的几件事仅是钱老对我国航天事业贡献之九牛一毛。祝钱老健康长寿，祝我国航天事业与日俱进，兴旺发达。

作者简介：梁思礼　火箭控制系统专家，导弹控制系统领域的创始人之一，中国科学院院士、国际宇航科学院院士。曾任国际宇航联合会副主席、航天部总工程师、航天工业总公司科技委副主任、“长征二号”运载火箭副总设计师等职。曾任第八届全国政协委员，中国宇航学会副理事长。现为航天科技和航天科工两个集团公司科技委顾问，中国老教授协会副会长。曾领导和参加多种导弹、运载火箭控制系统的研制，是航天可靠性工程学的开创者和学科带头人之一，倡导和推广航天 CAX 和 AVIDM 的应用，为中国航天事业做出了突出贡献。1985 年获国家科技进步特等奖，1987 年获国家科技进步二等奖，1996 年获何梁何利科学与进步奖。

回顾钱学森同志对导弹发动机研究的关怀

王树声

众望所归的科学泰斗钱学森同志九十寿辰来临了！我衷心祝愿他老人家健康长寿、寿比南山。在这喜庆的日子里，我回想起一件往事。那是1957年5月一个春光明媚的日子，我到当时还是北京西郊的车道沟国防部五院报到，受到钱学森院长的接见，并进行了一次重要的谈话，使我终身难忘。他说："你是搞航空发动机的，到这里来是要搞导弹发动机。航空发动机和导弹发动机的任务都是提供动力，但作为导弹，其动力装置远比一般航空用的发动机在使用范围上要广泛得多。导弹射程可以是近程的，也可以是远程的；航线可以在低空，也可能是超高空；攻击目标可以是固定的，也可以是机动的；发射平台可以在地面上，也可以在空中、水面舰艇或潜艇上。所以其动力装置单纯用一种发动机是不能满足要求的。第二次世界大战中，德国V-2导弹动力装置使用了液体火箭发动机，但同时还发展了V-1导弹，使用了吸气式发动机，开创了在导弹上使用的先例。这说明当时德国导弹科学家是有远见的，既发展液体火箭发动机，又发展了吸气式发动机。后来美国研制了多种固体火箭发动机导弹，还有一家公司发展了一种导弹叫'波马克'，用的是冲压发动机。所以研制导弹用动力装置要目光远大些，不能单打一。要根据不同的型号任务研制发展不同类型的发动机，这是第一点。第二点就是研制导弹型号，动力装置必须先行。没有可用的动力装置，导弹设计是没法进行的。"44年前的这段谈话，使我得益匪浅，也决定了我后来工作努力的方向，永远不能忘怀。

为了贯彻动力装置先行的原则，在钱学森、梁守槃等老专家的建议下，1960年中央军委决定在老五院一分院成立液体发动机过程研究所，翌年9月归属三分院，改名为液体发动机研究所，由我接替梁老担任技术负责人。液体发动机研究所成立前后5年中，钱老很关心这个研究所，他担任五院的领导，工作很忙，照顾面很广，但仍抽空每月至少一次到我们所指导课题研究工作。在他指导下，首先是进行推进剂研究。那时液体火箭发动机所用推进剂的能量较低，要提高比冲，必须发展新型推进剂。钱、梁二老都大力主张发展偏二甲肼，但当时指导工作的苏联专家极力反对，认为毒性很大，会对人体造成积累性中毒。但两位老专家顶住这股风，由液体发动机研究所在军事医学科学院的协助下，于1962年10月完成了毒性研究，证明偏二甲肼是非积累性中毒燃料，继而又完成了分析操作规程和理化性能测试，并在试车台上进行发动机燃气实测取样分析，证明可用。同时开展了油肼-40燃料的研究，并在发动机上试车成功，性能比当时美国JP-X燃料性能优越。这两项成果在1964年全国新产品展览会上展出，并被授予一等奖。后来很多型号液体发动机

都采用偏二甲肼作燃料,目前仍是我国导弹和运载火箭主要动力燃料。

在液体火箭发动机研究中,钱老特别重视不稳定燃烧这个课题。他一再强调,发动机是导弹的心脏,心脏工作不正常,导弹非掉下来不可。特别是1960年后,我国开始研制大推力自燃推进剂发动机必须避免产生不稳定燃烧。1962年7月,我对液体火箭发动机不稳定燃烧课题总的安排提出建议,上报三分院梁老并抄报五院钱老。钱老指示:"要花力量啃这块骨头。不稳定燃烧要从燃烧动力学方面研究,另外从化学方面做些工作。试验是重要手段,理论探索也很重要。"遵照这些指示,具体课题从两方面进行,即低频不稳定燃烧和高频不稳定燃烧。液体发动机研究所在1964年完成了低频不稳定燃烧研究,取得了160次燃烧试验的宝贵数据。1963年开展了大推力发动机切向高频不稳定燃烧试验研究,于1964年完成了理论分析计算和燃烧室试验件并投产。在此期间,钱老专门召集有关科研院所、高等院校开会,共同审议了理论计算和试验方案,以确保课题的顺利进行。同时还根据高频压力测试的要求,完成了高频压力测量系统的研究,并研制了测量频率不低于2500Hz的电容式传感器参加全国新产品展览。钱老不但重视燃烧室不稳定燃烧研究,还支持开展供应系统压力脉动课题研究。这个课题主要是由分析供应系统的压力脉动可能使燃烧室形成脉动推力导致全弹共振的问题而提出的。事实证明,1967年美国"阿波罗6号"、"阿波罗8号"飞行中,及"土星Ⅴ号"第Ⅰ级、Ⅱ级发动机都出现过此问题,谓之为POGO不稳定现象。我国"三三一"工程也同样出现这一关键技术问题,谓之为纵向耦合振动问题。当时液体发动机研究所的研究方案是利用激振器激振解决这一难题,这与"三三一"工程"长征3号"发动机的试验方案思路是一致的。

在发展火箭发动机方面,钱老也很重视发展另一类发动机,即混合型火箭发动机,他在1962年所写的《星际航行概论》中就以"新型火箭发动机"作标题叙述这种发动机。后来他还亲自命名固体燃料、液体氧化剂组合为"固液型",而以液体燃料、固体氧化剂组合为"液固型",以区别有人称为"正"、"反"两类型的不严格性。在他的主持下,当时由液体所和科学院大连化物所抽调部分人员组成一个小组开展研制工作,后来还专门成立了研究室,20世纪80年代研究发展到一定规模。当然,混合型火箭发动机由于使用范围和一些客观条件,其发展不是一帆风顺的。所幸现在又有一些科研单位继续开展探索,希望他们做出成绩来,不辜负钱老当初的一番苦心。

在吸气式发动机用作导弹动力装置问题上不是没有争议的。钱老一直支持冲压发动机的研制。1964年他曾指出:"冲压发动机是个好发动机,但是个'复杂'(指对设计点敏感)的高级发动机,要得到好的性能,必须做细致的研究工作"。早在1962年老五院科技委员会首届年会上,他和梁老等老专家提出反舰导弹应使用冲压发动机作动力,以提高突防能力,对付海上来的侵略。事实上,欧美等国家直到20世纪80年代才提出低空超声速导弹的问题,可见中国专家的远见卓识。1964年9月召开的"海鹰3号"地舰导弹动力装置技术指标论证会上,钱老在总结中肯定了"海鹰3号"采用冲压发动机的可行性。从此,冲压发动机开始用于导弹型号上。现在从飞航导弹的发展来看,冲压发动机使用范围越来

越广,未来的高超声速导弹应用超燃冲压发动机指日可待。

以上是我从钱老首次对我所做的难忘的谈话引起的一些回忆,来说明贯彻他老人家卓越学术思想的一些片段经历,以表敬意。

作者简介:王树声 1919年11月出生,江苏省如皋县人。研究员。中共党员。1941年毕业于西南联大航空工程系。1946~1947年在美国普拉特惠特尼航空发动机工厂实习航空发动机制造毕业。1948~1950年任广西大学教授。1957年到国防部五院工作后,历任一分院三部发动机研究室主任、三分院液体发动机研究所副所长、所长。1965年任七机部三院三十一所所长。1983年任航天部三院科技委副主任。曾任“海鹰2号”导弹发动机副主任设计师,1978年获全国科学大会奖,1982年任“鹰击8号”副总设计师,1988年获国家科学进步特等奖,1987年当选为国际宇航科学院院士,1981年以来担任《宇航学报》副主编。

钱老对我国导弹事业的贡献

黄纬禄

九十载春华秋实，钱老迎来了他的九十华诞。

钱老的90年，是为中国航天事业的创立和发展倾注了大量心血，做出了杰出贡献的90年。我们可以说，钱学森的名字和中国航天事业是紧密相连的，在某种意义上讲，钱老已经成为中国航天事业的象征。没有钱学森，我们的航天事业也会发展，但今天发展到什么程度，是难以预料的。钱老无愧于“中国航天之父”的称谓。正如江总书记所说的，他就是“中国人的骄傲”。

一、祖国——你是我魂牵梦萦的母亲

钱老是在1934年远涉重洋到美国留学的。就像当年很多优秀的中国学子一样，面对混乱的世事，哀鸿遍野的河山，钱老很想能有所作为，拯母亲于水火之中。他给自己开的方子就是科学救国，到大洋彼岸的美国去开阔视野，学习人家的先进技术，希望有朝一日能报效祖国。

钱老在美国20年，仅仅用4年的时间就拿到了加州理工学院的航空、数学博士学位，其天分是一方面，其勤奋、刻苦的程度也是不言而喻的。以后，钱老致力于应用力学、火箭导弹研究、工程控制论和物理力学的研究，成为声名卓著的科学家。他也参与了一些机密军事研究。尽管钱老在美国有着丰厚的待遇和极高的声望，但他从未为自己在美国存一分保险，也没加入任何有利可图的股份公司，因为他从来没有想过要留在美国，祖国是他魂牵梦萦的母亲。

1949年祖国解放，早已开始准备回国的钱老加紧了回国的准备，但当时正值美国“麦卡锡主义”横行，钱老受到政治迫害，被滞留在美国达5年之久。当年美国人非常不愿意放他回来，因为正如美国一位军方负责人所说的，“他抵得上几个师”。最后，在祖国的帮助下，钱老这个海外赤子如愿以偿，终于回到了祖国母亲的怀抱。他带回来的，不仅是他一颗火热的心，还有他名彪青史的学识和才华。这位“高才硕学”的科学家从此翻开了新中国航天事业崭新的一页。

1955年，回到祖国的钱老应邀到东北地区考察。11月的一天，他来到了哈尔滨军事工程学院。出乎意料的，是哈军工院长陈赓大将亲自出来迎接他。陈赓是清晨乘专机专门从北京赶来接待钱老的。在陪钱老转了一圈后，陈赓大将问钱老：“钱先生，您看我们能不能自己造出火箭、导弹来？”钱老说：“有什么不能的，外国人能造出来，我们中国人同样能

造得出来，难道中国人比外国人矮一截不成?”兴奋的陈赓大将握住钱老的手说:“好，我要的就是你这句话。”这段经典的对白“哗”地拉开了我国导弹和航天事业的序幕。

1955年，钱老为军队高级将领以及有关技术人员作了介绍导弹技术的报告。那时，我在通信兵部研究所，有幸也参加了报告会。那是我第一次见到钱老。钱老的报告深入浅出，引起了我军高级将领的极大兴趣，起到了宣传、普及有关导弹基本知识的作用。

1956年春，钱老积极参与制订新中国《1956～1967年科学技术发展远景规划纲要》的工作，它将喷气技术和火箭导弹事业纳入了国家长远规划，勾画了这一尖端技术的发展蓝图，对推动这一事业的发展起了重要作用。

1956年12月，一份由钱老起草的关于《建立我国国防航空工业的意见书》提出了我国火箭导弹事业的组织方案、发展计划和某些具体措施，还开列了可以调来参与这一事业的21位高级专家名单。钱老的《意见书》受到了党中央的高度重视。遵照中央军委的决议，钱老负责组建我国第一个火箭、导弹研究机构——国防部第五研究院，并任第一任院长，继而兼任国防部第五研究院一分院院长，在周总理和聂帅的直接领导下，开始了作为新中国火箭、导弹事业技术领导人的长期经历。

五院成立后，钱老给刚分配来的大学生举办培训班，讲导弹的基本知识《导弹概论》，这批学生为自己能亲耳聆听这位世界知名科学家的讲课而感到十分荣幸。他们之中的许多人后来成为我国航天技术的骨干。在他的倡导下，导弹技术训练班继续开办下去，除他亲自授课外，任新民、梁守磐等也给新来的大学生讲课，一边讲课一边结合具体工作开展讨论，边学边干，逐步建立起导弹总体、空气动力学、发动机、弹体结构等研究室。从工作计划、场地选择、人员配备、仪器购置到与上级和兄弟单位的协调，钱老日理万机，工作有序进行。

钱老组织五院科研人员仿制前苏联提供的教学和科研弹，通过仿制，“爬楼梯”，大练兵，向独立设计的方向发展。苏联专家撤走后，党中央决定要自力更生，发展我国尖端技术。我们自己的专家受到了高度重视。钱老这一时期在五院的技术工作中发挥了突出的作用。每个星期天下午，他都把二院的我和一院的屠守锷等几位总师请到他家里，讨论重大技术问题。他按照民主集中制原则，先请我们充分发表意见，对于意见一致的问题，他当即拍板决策;不一致的，如果不急办，留在下星期的会议讨论;如急办的，则由他根据讨论情况提出解决办法，大家分头去办。在办的过程中，如发现有行不通的，下星期提出来重新讨论，如办成了，功劳是大家的;失败了，责任由他承担。这个时期，我们真正是心情舒畅，畅所欲言。在研制“东风1号”时，控制系统遇到困难，钱老就亲自到十二所，和科研人员一起讨论导弹控制系统的发展规划，指导解决问题，组织讨论。

在“东风1号”仿制即将成功的时候，聂荣臻元帅指示，五院要突破从仿制到独立设计这一关，建立我们自己的高技术水平的导弹技术系统，实现我国导弹技术发展中质的飞跃。在“东风2号”研制发射成功后，钱老组织五院干部职工讨论，形成了《八年四弹规划》，涵盖了中近程、中程、中远程和洲际导弹四种射程。在此期间，钱老深入基层、接近群

众,遇到困难和技术人员一起讨论,提出建议。重要的试验,尤其是第一发弹,则亲自到靶场参加。

1962年3月,“东风2号”出人意料地坠落在离发射塔不远的戈壁沙滩。全体参试人员既震惊、痛惜,又感受到了巨大压力。这时钱老正在基地。面对情绪低落的人群,他诙谐地说:“我在美国,每写一篇重要的论文,成稿没几页,可是底稿却装了满满一柜子,科学试验如果能够次次成功,那又何必试验呢……”寥寥数语,勾勒出一代科学宗师严谨治学的风采。

早在美国学习时,钱老就如饥似渴地研究现代科学技术的基础理论,每天工作长达十几个小时。曾经有一位教授向钱老的老师冯·卡门夸奖钱老的聪慧和勤奋,幽默地称他也有犹太血统,因为当时在世人看来,犹太人的聪明和勤奋是世界闻名的。事实上,在钱老的犹太同学进入教室时,钱老早已在那里刻苦攻读了。

钱老在美国的研究工作也十分严谨认真。每做一个课题,先要查阅大量文献资料,从理论模型的提炼与建立、数学运算和数值计算、作图制表直到与实验结果的对照,一步一步,一点一滴都周到细致,一丝不苟。一旦发现有误,便进行修正,甚至推倒重来,直到最后得到满意的结果为止。1942年,美国军方委托加州理工学院举办火箭和喷气技术训练班,钱老是教员之一。当时的一些学生回忆,他总是对教学工作尽心尽责,黑板上总是写满了数学公式,逻辑严谨,书写工整,从不出错,甚至连个符号都不错。他讲的内容比教科书上多得多,也好得多。他们感到这位年轻教师为讲好这门课至少要花5~10倍的时间进行准备。

钱老回国后,作为火箭、导弹和航天事业的技术领导人,把这种严谨治学的精神进一步发扬光大。1957年,钱老随聂帅赴前苏联访问,按中央规定的方针和聂帅提出的统一口径和苏方谈判,他要求自己该问清楚的问题一定要问清楚;在“1059”仿制工作中,他要求工作人员不限文化水平,只要做了工作,都要写出总结报告;“东风2号”首试失败后,钱老同大家一起排除疑点,分析失败原因。问题一一找出来后,提示只有在地面模拟试验合格的全弹系统,才允许进行飞行试验,即不带问题上天。在制订《八年四弹规划》前期,钱老组织有关专家就地地导弹发展问题展开讨论,为制订具体的规划明确方向,在此基础上,又发动工人、技术人员和领导干部3000多人参加规划方案讨论,在充分发扬技术民主的基础上,最后才形成《规划》,充分显示了钱老作为技术领导人的虚怀若谷和严谨求实的精神。

二、难得的科技帅才

新中国成立50多年来,我国的科技战线上可谓人才辈出,各路英豪各显其能,但同时兼具业务和领导才能的就要少得多了,而钱老正是这样一位难得的科技帅才。钱老的组织协调能力给当年包括我在内的许多科研人员都留下了深刻的印象。

20世纪60年代初,当时五院下辖的一分院和二分院都是专业研究院,一分院负责总

体，二分院负责控制系统，两个分院在工作中难免会在协调方面出现各式各样的问题，钱老就把我们两个分院的总师请到他家中讨论、协调，这样许多问题就迎刃而解了。

钱老任国防科委副主任时，我国要进行原子弹和导弹这两弹结合的飞行爆炸试验。钱老为此花费了很多的精力，除地面试验和飞行试验等技术方面的问题外，在五院和九院(即核研究院)的工作协调上也做了大量工作。当时，五院的一分院负责导弹的总体设计工作，认为自己也该是结合了的两弹的“总体”，但九院则认为五院一分院只是导弹的“总体”，不该是原子弹的总体。经过钱老认真细致的工作，两个单位最终统一了认识，携手取得了我国第一次核试验的成功。

我在任固体潜地导弹“巨浪 1 号”总设计师时，遇到了许多与海军协调的问题。因为“巨浪 1 号”需要在潜艇上发射，海军希望在地面模拟试验万无一失的情况下再上艇。当时在基地挖了模拟试验用的水池，但经过计算，工程造价过高。负责型号总体设计的四部论证，带有水舱的模型弹即使发射失败也不会殃及潜艇。四部和海军各执一词，钱老在听取了四部的汇报后，觉得安全是有保障的，就出面做军方的工作，使问题得到了圆满的解决。

钱老几十年对我国的航天事业的丰功伟绩一时是难以言尽的，他的认真细致的工作作风和严谨求实的治学精神为我国航天科技工作者树立了一座丰碑。

祝钱老身体健康！

作者简介：黄纬禄　导弹与控制技术专家，中国科学院院士，国际宇航科学院院士，航天科技、科工两个集团公司高级顾问。长期从事导弹武器研制工作，成功地领导我国第一发固体潜地战略导弹的研制，提出“一弹两用”设想，将潜地弹搬上岸，研制成功陆基机动固体战略导弹武器系统，这两个型号的研制成功探索出固体火箭研制规律。1985 年“巨浪 1 号固体潜地战略武器及潜艇水下发射”获国家科技进步特等奖。曾荣获“北京市科学技术先进工作者”、“北京市劳动模范”、“航天工业部劳动模范”、“全国优秀科技工作者”、“五一劳动奖章”、“全国先进工作者”、“求实基金奖”、“两弹一星功勋奖章”等多项荣誉称号。

钱学森教授——中国火箭探空事业的倡导者

李大耀

杰出科学家和工程技术专家钱学森教授对世界和中国科技事业的贡献是多方面的。本文仅记述钱教授作为中国火箭探空事业倡导者一些鲜为人知的事。

1958年8月,中国科学院为了开创中国的人造卫星事业成立了以钱教授(时任中国科学院力学研究所所长)为组长的、负责组织和协调人造卫星工作的领导小组(又称“581”领导小组)。“581”领导小组下属三个设计院。其中,承担人造卫星和运载火箭总体设计任务的一〇〇一设计院于1958年11月由北京搬迁至上海,由上海市增补力量组成了上海机电设计院。

作为中国空间技术领域一支新兵的上海机电设计院,为了积累研制卫星运载火箭的经验和锻炼研制队伍,决定首先以德国V-2火箭为蓝本研制有控制的探空5号(T-5)液体火箭。T-5火箭虽然起飞质量和地面稳态推力均只有V-2火箭相应值的1/5,但对从未搞过火箭的上海机电设计院来讲,却是一项难度极大的工程。尽管经过研制人员的顽强努力,于1959年年底完成了一枚模型火箭的结构总装,但该火箭尚不具备进行飞行试验的能力和条件。

在T-5火箭研制期间,中国科学院党组于1959年年初根据中共中央总书记邓小平关于现在放卫星与国力不相称、要调整空间技术研究任务的指示,决定纠正在基本条件不具备的情况下急于搞人造卫星的偏向,中止大型运载火箭和人造卫星的研制,把力量转到重点搞探空火箭上来,以研制探空火箭作为练兵手段。时任上海机电设计院业务领导单位的力学研究所所长钱教授,经过调研将中国科学院党组的决定进一步具体化。钱教授根据中国的国情以及火箭技术的发展现状和需求,于1959年7月10日致函上海机电设计院,建议设计院改变原定设计运载火箭发射人造卫星的计划,把设计院改组成为一个设计和试制小型火箭的单位,以研制气象火箭作为具体任务之一。

钱教授的建议使上海机电设计院更坚定了他们从T-5火箭研制实践中得到的在研制经验缺乏、技术储备不足、国家投资又十分有限的情况下宜选择技术难度较小的无控制火箭作为发展火箭技术的突破口这一认识,促进了上海机电设计院更快地转入发展气象火箭的道路。

1960年2月19日、9月13日,上海机电设计院负责研制的“探空7号”(T-7)气象火箭的模型火箭(T-7M火箭)和T-7火箭相继取得了飞行试验的首次成功。毛泽东主席于1960年5月28日在上海视察T-7M火箭产品时,对研制人员依靠自己的力量取得火箭技

术的进展给予了高度评价，认为 T－7M 火箭虽然只能飞到 8km 的高度“那也了不起”，并指示中国的火箭探空“应该 8km、20km、200km 地搞上去”。

在此基础上，上海机电设计院及其后身北京空间机电研究所又于 1963 年 12 月研制成功了一种运载能力较大的“探空 7 号”甲(T－7A)气象火箭，并于 1964～1969 年将 T－7A 火箭用于进行生物高空试验、电离层探测、“长征 1 号”运载火箭末级发动机点火系统的高空性能试验、返回式卫星红外地平仪和摄影胶片的高空性能试验，还于 1965～1989 年研制发射了“和平 2 号”固体气象火箭、“和平 6 号”小型固体气象火箭和“挺进 1 号”甲等动力学取样火箭、“挺进 2 号”取样火箭等探空火箭，从而使火箭探空成为中国在高新技术领域中较早取得突破、较早达到国际水平而且应用较为广泛、成果较为丰硕的一个领域。继北京空间机电研究所之后，承担探空火箭研制任务的国防科学技术大学于 1976 年以来，相继研制成功了“织女 1 号”小型固体气象火箭和“织女 2 号”高空探测火箭，为中国的火箭探空事业创建了新的业绩。2000 年 10 月、2001 年 8 月，中国航天科技集团公司第四研究院研制的“天鹰 3 号”、“天鹰 4 号”微重力实验火箭首次飞行试验相继告捷。这两种火箭将成为中国火箭探空事业进一步发展的生力军。

钱教授不仅倡导了中国火箭探空事业的发展，而且十分关注这一新生事物的成长。仅 1960 年，钱教授就至少三次亲临现场指导工作。其中，一次为 4 月 18 日陪同国务院副总理聂荣臻视察T－7火箭发动机热试车；一次为 4 月 29 日与中国科学院副院长张劲夫一起视察T－7M 火箭第六次发射；一次为 12 月 28 日与中国科学院副院长斐丽生一起视察 T－7火箭第三次发射。钱教授深入实际、一丝不苟的科学精神和平易近人、热情认真的工作作风，给参试人员留下了深刻的印象。

值钱学森教授九十寿辰之际，谨以此短文表达笔者对他的崇敬之情。

参考文献

1 李大耀．中国探空火箭 40 年．北京：宇航出版社，1998

作者简介：李大耀 1940 年 8 月出生，江苏省南通市人。研究员。1958 年 12 月毕业于复旦大学数学系。历任北京空间机电研究所办公室主任、所科技委员会秘书长、常务副主任，兼任中国空间科学学会常务理事和空间探测专业委员会副主任。主要从事探空火箭总体设计、运载火箭总体设计和飞行力学、优化技术、卫星设计方法、航天技术史等方面的研究工作。发表论文近百篇，作为主编和副主编出版专著 3 部。

空间磁学和核磁学

——钱学森院士对交叉磁学的关注和卓见

李 国 栋

钱学森院士是对我国现代科技及国防事业的发展和世界科学都有着卓越贡献的著名科学家,在我国“两弹一星”的建设中更是功勋卓著。他对于新兴科技的发展及交叉学科的研究和关注也对我国和世界的科技事业产生了重要的影响。

钱学森院士对交叉磁学的关注和卓见是笔者在一次学术报告会中体会到的。大约在20世纪80年代中后期,国防科工委一个研究所的负责同志邀请作者去他们所里做一次关于空间磁学和核磁共振成像等的学术报告。他说这是钱学森院士向他们提出的,他也可能来参加这次报告会。他们大约是看了我每年写的广义磁学进展的综述文章。笔者从20世纪50年代起就知道钱学森院士热爱祖国,克服多种阻力后回国,曾任中国科学院力学研究所所长,后又在国防航天部门任领导,指导科技工作,对航天科技做过重大贡献。作者很敬重他冲破阻力回到祖国的爱国精神。在那次学术报告会中,钱学森院士果然来了,而且他在报告中提出了一些很有意义和创见的问题和看法,使报告人和听众都极为受益。现在将那次报告会的主要内容和钱学森院士的一些看法就笔者记得的介绍如下。

报告首先是从广义磁学讲起的。现代大量的磁学和相关科学研究指出,磁现象是普遍存在的,任何物质都具有强弱不同的磁性。从我们周围的宏观物质一方面到微观的原子、原子核和基本粒子,另一方面到地球、行星、太阳、其他天体和宇宙空间物质,都具有一定的磁性。例如,中子虽不具有电荷,但却具有磁矩。任何空间都存在高低不同的磁场,近从我们身体便存在微弱的磁场如心磁场和脑磁场等,远到各种天体和宇宙空间也存在天体磁场和宇宙空间磁场。由于历史的原因,有的人把物质的弱磁性称为无磁性或非磁性,而把物质的强磁性称为磁性或有磁性。实际上,无磁性是无强磁性,非磁性是非强磁性,而磁性或有磁性则是强磁性或有强磁性。同样,零磁空间或零磁场空间也仅是在一定范围内两种大小相等和方向相反的磁场互相抵消的结果。一般的磁屏蔽室只是利用磁屏蔽装置把磁场强度降低到一定程度,而不会降低到零。磁现象不但是普遍存在的,而且还同我们有着不同程度的关系。例如,发电机和电动机都是利用磁场使机械能与电能互相转换;磁录音机、磁录像机和电子计算机的磁存储器则是把声音、图像和数字信息最后转换为磁信息在磁性材料中保存下来。需要时,通过相反的过程又可还原为声音、图像和数字。磁应用的例子是非常多的,因此可以说我们是生活在磁的世界里。

钱学森院士寓意深刻地指出,从当代磁学的发展,特别是交叉磁学的发展,可以看出

当代科学发展的一些重要特征，例如研究领域的扩大，交叉学科的兴起，等等，同时也显示出系统科学研究的重要性。

在报告中，作为一个中国的磁学研究工作者，笔者也简要介绍了中国古代磁学的一些重要贡献。例如在春秋战国时期，便有了磁石（古代称慈石）、磁石吸铁、磁石指示南北方向的记载，还将磁石指示南北方向的特性制成了指示南北方向的最早的指南器，称为“司南”。这些在古代书籍如《管子》、《山海经》、《吕氏春秋》和《论衡》等都有记载。指南器的进一步发展是在北宋时代先后发明了指南鱼和指南针。指南鱼和指南针不但在军事上得到应用，而且更重要的是指南针在航海上得到重要的应用，例如出使南洋和朝鲜都有应用，特别是明代初期郑和多次远航东、西洋，远达西亚红海和东部非洲时，指南针都起着重要的作用。指南针传到欧洲后，对哥伦布发现美洲新大陆和麦哲伦航行地球一周等海上航行也做出过很大的贡献。在制作指南鱼的过程中，最先使用了利用地磁场中热处理以增强磁性，还隐含着地磁倾角的利用。在制作指南针时又最早使用了感应磁化的方法，而在利用指南针时最早观测了地磁偏角现象。另外，《史记》中还记载了利用磁石治疗疾病。在许多史书中记载了北极光和太阳黑子的现象，这些记载在世界上不但是最早的，也是最多的。现代科学的研究指出，北极光是一种高空原子分子等在高空地磁场中运动碰撞产生发光的地磁现象，太阳黑子是黑子处太阳磁场很强而引起温度降低的太阳磁现象。总之，中国古代对磁现象的观测和应用不但在世界上产生重要的影响，而且在世界上也是最早或者居于前列。

热爱祖国的钱学森院士对祖国在古代磁学上的许多重要贡献是很高兴的，还指出中国古代对世界有重要影响的许多发现和发明中除指南针外，火药和利用火药制造的一些武器和器件也对现代的多种武器和飞行技术有过影响。

在介绍空间磁学时，除了再次指出宇宙空间包括行星际空间、恒星际空间、星系际空间和各种星体都存在不同强度的磁场外，特别强调同磁场相关的太阳风和空间气象问题。太阳风是由太阳喷射出的带电粒子流及相伴随的太阳磁场。这种磁场在太阳系中形成行星际磁场。如果太阳产生强烈的高能量喷发，磁场也会增强，在空间和地球等行星附近形成磁暴。高能量粒子流和磁暴会对空间航行通信和宇航人员产生很大的影响和危害。如何预测预报太阳风的变化？因为太阳风来自太阳，这就需要对受太阳磁场影响的太阳活动（如黑子、耀斑和日珥等）进行观测，这样就形成了空间气象学，而太阳磁场则起着重要的作用。空间和天体磁场的观测研究还取得了一些用其他方法难于取得的研究结果。例如，几次阿波罗飞船的宇航员登上月球，从测得的月球磁场和月岩磁性，可以推测月球内部全为固态物质。又如，从行星飞行器测得的木星磁场，可以推测木星内部可能有金属氢存在，而金属氢是当前在地球上不存在、也尚未研制成的一种材料，可能是一种高温超导体和一种高能量燃料。再如，由武仙星座 X－1 脉冲双星的 X 射线谱的观测，可以推论其星体磁场高达 $10^8 \sim 10^9$T，这同理论的推测是符合的。

钱学森院士对这些空间磁学的研究成果及其对空间科学和空间航行的作用是很感兴

趣的。他还着重指出空间磁学在空间科学中不能被忽视仅不过是一个例子,还有许多同空间科学有着多方面联系的科学技术也是航天科技研究应该重视的。这也还需要注重交叉学科、系统科学和系统工程技术的研究。

邀请作的报告中提出的另一问题是核磁共振成像。在讲这一问题时,先简单说明原子弹和原子能发电及氢弹和正在研究的核聚变发电是分别利用重原子核的裂变能量和轻原子核的聚变能量,而核磁共振成像则是利用原子核的磁性。它是在原子核磁共振(简称核磁共振)的基础上发展起来的。核磁共振是物质原子中的原子核磁矩系统在恒定磁场和高频磁场的同时作用下,当恒定磁场的强度和高频磁场的频率满足一定的条件时,原子核系统便会最大地吸收高频电磁场的能量。由于绝大多数化学元素的原子核都具有原子核磁矩,所以核磁共振的应用是十分广泛的。一般核磁共振是所测对象在均匀的恒定磁场强度下进行测量的,故测量结果是整个所测对象的平均值。而从核磁共振基础上发展起来的核磁共振成像则是所测对象在一定频率的高频磁场下,恒定磁场强度则按一定的时间序列进行逐点扫描的,像电视机扫描一样。这样在电子计算机的一定程序控制下,所测对象各点的核磁共振信号强度或其他核磁参量便会像电视机一样出现核磁共振信号强度或其他核磁参量的图像。这样得到的核磁共振成像常被称为核磁共振 CT。CT 的意义是英文 computerized tomography(计算机化层析照相术)的缩写。同医学上应用的 X 射线 CT 相比较,X 射线 CT 与一般 X 射线照相相比,虽然能得到人体的一定截面的照相,但仅是该截面的 X 射线吸收密度分布像,而核磁共振 CT 得到的则是一定截面内的某种原子核浓度,即该种原子浓度的分布像,或者该种原子核的核磁参量的分布像。可以看出,由核磁共振 CT 得到的人体内部的信息,要比由 X 射线 CT 得到的人体内部的信息要丰富得多。目前应用的核磁共振 CT 虽然仅是氢原子核(即质子)的一种,但从原理上看,许多原子核都是可以进行核磁共振 CT 的。对生物很重要的碳和氮等原子核的核磁共振 CT 技术已经在进行实验研究。当然同氢原子核的核磁共振 CT 相比较,其他原子核的核磁共振 CT 的灵敏度和分辨率等都较低,需要解决实际应用中的许多技术问题。但是可以预期,这些技术问题随着科学和高新技术的发展都是可以不断获得解决的。从磁共振一般原理看,核磁共振 CT 在将来还可以发展到电子顺磁共振 CT、铁磁共振 CT、电子回旋共振(又称抗磁共振)CT 等,这些磁共振 CT 都各有其特点和多种的应用。当然这些仅是科学上的展望,其实现还需要解决许多科学和技术上的问题。

钱学森院士对于核磁共振 CT 的功能和应用甚为重视,认为它不但在医学上会有重要的应用,而且还将在物质结构和材料分析上开辟新的应用领域。从某种意义上说,这也是系统科学和系统工程技术可以应用的一个新领域。特别是核磁共振 CT 应该说还有许多可以进一步发展其功能和应用的新领域。

钱学森院士对办这次学术报告的建议和在报告中的几次发言,都使报告者和听众深深体会到他的知识广博,兴趣广泛,对一些交叉学科、新兴科学和高新技术都十分关注。他不但考虑问题深刻仔细,而且还会在其广博的基础上提出富有科学意义和广阔发展前

景的意见，让大家体会到和学习到一些极有意义的东西，给大家留下深刻难忘的印象。

作者简介:李国栋　物理学家。1927年生于四川省遂宁市。中国科学院物理研究所研究员。1951年毕业于南京大学，同年考入中国科学院应用物理研究所(1958年改名物理研究所)。一直在物理所从事多方面的磁学研究工作，兼任四川大学、中国科技大学、北京科技大学等9所大学教授，全国科学技术名词审定委员会中物理学名词委员会副主任和外国科学家译名委员会副主任，量和单位国家标准电学和磁学顾问，中国科学院三环新材料高技术公司高级技术顾问，并兼任《中国科学》、《科学通报》、《物理通报》、《生物磁学》、《现代物理知识》等多种科学期刊编委。享受国务院为发展我国自然科学事业做出突出贡献的政府特殊津贴。培养或合作培养博士及硕士研究生10多名。著(或合著)有《铁氧体物理学》、《生物磁学及其应用》、《电磁学发展史》、《当代磁学》等10余种论著；译(或合译)有《现代磁学》、《超高频铁氧体》、《穆斯堡尔谱学》、《磁性玻璃》等约10种论著。在国内外发表研究论文70多篇，科学综述等400多篇。

向钱学森同志学习

谢光选

1991年10月15日,庄严的人民大会堂召开隆重大会,刘华清同志代表国务院、中央军委宣读了授予钱学森"国家杰出贡献科学家"荣誉称号和"一级英雄模范奖章"的决定。杨尚昆向钱学森颁发了证书和奖章。江泽民总书记在会上作了重要讲话,勉励全国的科技人员、工程技术人员向钱学森同志学习,在祖国四个现代化建设中做出贡献。钱学森在会上致了答词。当时,他已经80高龄了,但听着他的讲话,仍感到其思路清晰,思维敏捷,讲话层次分明,目的清楚,说理深入浅出,令人顿开茅塞,使人易于接受,不拿讲稿而一气呵成。在听他讲话时,中国运载火箭技术研究院院长沈辛孙同志向我耳语说:"钱老已耄耋之年,讲话仍一如既往。"我不住地点头称是。

在钱老的讲话中,谈到了他的三次激动:突破封锁、学成回国;和焦裕禄及孟泰等人同列为无产阶级知识分子;光荣地参加了中国共产党。从他的讲话中,我深切地感到了他"热爱祖国,热爱人民,热爱中国共产党"的真情实感,这也是他高尚品质、崇高信仰的具体体现。

钱学森同志曾担任过中国运载火箭技术研究院的第一任院长,在他的领导下,研究院打下了坚实的基础,脚踏实地地向前迈进,取得了一个又一个的成绩,夺得了一个又一个的胜利,成为中国航天事业的一个重要单位。在他的帮助和教育下,我也受益匪浅。

一、科技队伍的培养,从抓学习开始

1957年春,我调入国防部第五研究院。一天,他找我谈话,我向他汇报了曾经做过的工作:火箭炮、反坦克火箭、TNT不经熔化直接压入炮弹壳内、生产线的设计与调试,等等。他问我反坦克火箭是否用了Hollow Charge,推进剂是否用的是NC和NG的混合物(Nitrocotton和Nitroglycene)……我十分惊讶地说:"这些专业性很强的问题你是怎么知道的?"他说是在书上看到的,并告诉我:导弹和火箭有许多知识要学习,否则不能适应我国国防事业的需要,又告诫我要多读点哲学书,实践论是历史唯物主义的发展,矛盾论是辩证唯物主义的发展,要讲究思想方法和工作方法,才能使导弹火箭的研究取得事半功倍的发展。

这是我和钱学森同志的第一次接触,我感到了他的人格魅力:作为著名的科学家,他基础知识深厚,学问渊博;同时,在与你的接触当中,又平易近人,讲究工作方法,善于从思想上给你以正确的引导,使你收获颇丰。从此,我开始以《导弹设计原理》(钱学森作序,1957年5月)后改为"Handbook of Astronautical Engingeering"(1961年版)为索引,补充了许多

学科知识。学无止境，持之以恒，直到今天。

在他担任院长的1961年3月，一院党委扩大会决定，在全院进行认真学习毛泽东著作，进行形势任务教育的活动，大抓科学技术业务学习，并提出了七个方面的要求：要以老带新，边干边学，远近结合，学术研究提倡争鸣，培养良好的读书风气，通过一个型号研制的全过程，熟悉业务，精通业务，尽快造就一支又红又专的研制队伍。在院党委的部署下，全院掀起了学习的热潮，各单位办公室夜间灯火通明。当时正值三年困难时期，由于大家在政治学习和业务钻研方面时废寝忘食，1961年7～9月间，出现了浮肿病人1 600多人。为此，院政工、行政部门的同志一方面在夜间出来进行劝阻，另一方面，组织并发放聂荣臻元帅向各大军区募集来的食物及院里自筹的物品，如大豆、苹果、肉类等，以补充营养不足，使全院上下的热情空前高涨，促进了思想和科技水平的双飞跃。

二、依靠组织和群众，制定了我国第一代导弹的技术发展途径和步骤

在美国对我国进行封锁禁运，前苏联片面撕毁合同、撤走专家的情况下，遵照党中央"自力更生，重点发展"、"两弹为主，导弹第一"的指示，钱学森协助聂帅狠抓了航天系统各类导弹的研制工作，使之从无到有，从小到大，制定了技术发展途径和工作步骤，并把发展的重点放在地地导弹上。

1962年2月2日，国防部五院科学技术委员会成立，钱学森任主任。同年4月21日，根据聂帅关于制定五院技术路线的指示，钱学森组建了综合规划组、地地型号组、地空型号组，进行专题型号研究，以后又成立了固体火箭发动机组，要求各院酝酿，写出报告。一院在当时任地地型号组组长屠守锷的组织和领导下，首先收集资料，研究国外发展情况，结合我国工业实际，经过反复讨论，总结出了一条适合我国发展的地地导弹技术发展途径，由一部写出第一稿，由屠守锷做最后修改后报五院科技委。

1963年4月2日，五院科技委召开了首届年会。会议由钱学森主持，讨论了地地、地空、海防导弹的技术发展途径。屠守锷代表地地导弹组提出10个问题，即：①选用固体火箭还是选用液体火箭；②液体推进剂的选择；③液体发动机的推力；④控制系统；⑤执行机构；⑥战斗部防热问题；⑦多级火箭用并联还是串联问题；⑧弹体直径问题；⑨推进剂的增压问题；⑩弹体结构材料和工艺问题，对这些问题进行了分析和说明。钱学森同志对屠守锷的发言表示赞同，还确定了有共性的可靠性问题、飞行试验学、火箭撬等多项研究工作，会议于5月16日结束，张爱萍代表国防科委作了重要讲话，称赞导弹技术发展途径依靠各级组织，发动各类专家，博采众长而制定，是快、好、省的发展方向，为第一代地地导弹的发展奠定了基础。同时对专家们的辛勤劳动表示了衷心的感谢。

三、钱学森指导了我国导弹的设计与研制

1960年11月5日，我国仿制的近程导弹（1059）发射获得成功，这是我国第一次系统工

程的成功运用，在这次仿制中，共动用了县团级单位 1 450 个，使用了 70 种学科知识（专业技术），以综合国力在尖端事业上开始了突破。

1962 年 3 月 21 日，我国自行设计的中近程导弹“东风 2 号”进行飞行试验，起飞后出现了飞行不稳定，导弹大幅度摇摆，发动机舱着火，推力消失，69 秒后坠落发射点 7km 处，聂帅和钱学森向参战人员指出：“既是试验，就有失败可能，要总结经验教训，吃一堑长一智，以利再战。”钱学森在听取故障查找原因时指出：要从遥测、光测参数中加强分析，找到设计综合不足之处。钱学森还认为：要加强地面试验，要有专职的技术干部来当设计师，并建立设计师系统。遵照钱学森的指示，一部与各单位协同，充分发动群众，历时 3 个月，找到了失败的原因：一是总体方案设计没有将整个箭体作为一个弹性体来考虑，火箭飞行中，惯性器件感受火箭绕质心的姿态角和横向弹性振动的扭转角，不分青红皂白放大后，将指导令下达到伺服机构，使飞行稳定系统失常，飞行姿态角发散；二是发动机强度不足，局部破裂引起着火。钱学森同意了故障模式形成的机理，再次强调找出总体设计综合不足之处（以后我们称之跨学科的技术协调和学科交叉综合开拓应用——见《导弹与航天运载技术》1994 第 1 期、1998 第 4 期）。

根据钱学森“加强总体综合”的指示，屠守锷和我研究把火箭看成一个变剖面，两端自由一自由的梁分成若干个剖面来作计算，由一部一室梅相岩、韦德森、戴诗正、林开彬等人将计算方程式组画成计算表格。由顾循珍等同志用手摇式齿轮计算机，历时 3 个月，得出一、二、三阶箭体弹性振动数据。钱学森对此十分赞赏，并给予了肯定和鼓励。这些数据送到了十二所，梁思礼等同志利用低通电子网路将一、二、三阶振动的波形滤去，留下频率低的绕导弹质心的姿态角波形，经过综合放大以后送到伺报机构，纠正导弹的姿态，达到全箭的飞行稳定。

一部五室由刘子平主持按“加强地面试验，凡是能被地面试验证实或模拟试验证实的，不要带到飞行试验中去考验”的思路，总结国外经验，按系统工程 PERT（Program Evaluation Review Technique），提出须经单项或综合性的地面试验共 17 项，才能允许进入现场进行飞行试验。

钱学森肯定了这两项工作，并指出今后要加强各学科（专业）之间的技术协调，并由导弹总体设计部负责综合平衡，以免故障再现。国防部第五院任命了“东风 2 号”设计师系统：林爽为总设计师，屠守锷、黄纬禄为副总设计师、主任设计师，谢光选（总体）、梁思礼（控制）、刘传儒（发动机）、刘元（地面设备），专司设计之职。

一院根据五院批准的 17 项地面试验，建造了试验设施，完成了 17 项地面设计试验，火箭于 1964 年 6 月 29 日，在二十基地进行飞行试验，取得圆满成功。钱学森在事后问我：计算出的箭体一阶振动频率和试验测出的频率差多少，我回答：最大 0.5Hz，钱学森高兴满意地笑了，他和我们一起共享了科技成果和飞行试验成功的喜悦。

这次发射成功，标志着我院已具备了自行设计能力，在钱学森的鼓励下，我们将脱胎换骨，发展具有我国特点的、完全是我们自己研制的中程导弹。

1965年2月18日到3月7日,七机部党委和一院党委共同召开会议。议题是讨论制定规划,王秉璋、刘有光、钱学森等同志主持会议,原国防科委安东秘书长、国防工办领导赵尔陆也参加了会议。一共有510人次到会发表意见,会议开得生动、活跃、成功,再次明确了采用可贮存的推进剂。在明确重大协作项目的进度之后,采纳各方面意见,两级党委经过认真讨论后形成了决定意见报党中央。到1971年,我们完成了近程(1 000km)、中程(1 000~3 000km)、远程(3 000~8 000km)、洲际(8 000km以上)四种战略导弹的研制,原计划要在1971年完成向太平洋发射洲际导弹,因为"文化大革命",推迟到1980年5月才取得了发射洲际导弹的成功。

四、协助聂帅,使我军具有实战尖端武器,壮军威,壮国威,振民心

钱学森同志认识到,导弹没有核武器,就形成不了杀伤破坏能力;相反,核武器没有导弹相辅,对万公里以外的目标也不具有威慑力,两者缺一不可。他常对我们讲:1960年9月13日军委提出的"发愤图强,突破尖端"、"两弹为主,导弹第一",要尽早拥有"积极防御,后发制人"的导弹核武器。

1964年10月16日,我国的原子弹试验成功,同年赫鲁晓夫下台,国外报道中国是有弹无枪。

1964年8月11日,中央军委对两弹结合的近期工作进行了布置,决定二机部、五院共同组织论证组,由五院抓总。1965年6~8月,由朱光亚同志带队,一院一部四室朱桂芳等12人赴青海进行技术协调工作。

两弹结合的重点在于弹头和原子弹的结合:原子弹要小型化方能装入弹头内。战斗部要经过主动段的力学环境,还要通过再入段更为恶劣的热力学环境,如力的传递、过载振动冲击、变形、位移、调温、调湿,保持弹头内的正常压力、工艺对接面的选取、对接模器制造试装等,聂帅和钱学森亲自或派人了解情况。

1966年3月1日,周总理主持了军委会,原则上同意国防科委提出的两弹结合先冷后热的试验安排,做好准备工作。聂帅在三座门进行了布置。由于钱学森重视技术协调工作,要明确两弹技术协调的负责人,经调查研究后,聂帅代表周总理宣布我为组长,龙文光为副组长。1966年8月31月,聂帅、钱学森同意两弹结合飞行试验大纲(一部八室魏其勇起草)。第一、二发导弹做引信爆炸高度试验,第三发导弹做安全指令先毁原子弹后毁导弹的试验,第四发导弹载原子弹飞行达到目标上空,并在一定高度实施核爆炸试验,第五发备份。

1966年9月8日,一院科技队伍从南苑车站出发,张震寰副主任同行,到达西北试验基地后和二机部九院的科技队伍一起进行合练。张副主任传达了聂帅指示:试验准备情况和重大问题随时向周总理汇报,关键时刻还要向毛主席报告。

根据聂帅加强结合部的指示以及钱学森同志提出的两弹结合技术协调不出漏洞的原则,两位组长按照聂帅的“三严精神”,以严格的要求、严肃的态度和严密的方法,进行了面对面的全面复查。

钱学森同志问我:查出什么问题没有?我回答说:我在 Eletric Circuit 方面不怎么熟。钱说:你找过梁思礼吗?一、九院研究电路原理图时,梁思礼建议在一院的电路中增加一个漏电电阻,防止高静电压产生,得到一、九院和基地同志的赞同。基地有些同志提出,按上级指示精神,要报聂帅批准后才能组织施工,双方意见不一。钱学森同志说:设计师系统有更改技术状态的权力。这项改动立即实施,并由我报告聂帅。我和一院试验队党委书记赵影林同志要求全队人员进行故障预想,查找问题,不留疑点上天。

朱桂芳同志随领导到弹着区检查工作后,认为核爆炸测量队伍离弹头落点太近,不安全。一院研究后,觉得测量工作队必须在四倍横向公算偏差加上原子弹爆炸威力半径偏北的距离以外。基地试验部表示异意:①多次发射落点都没有落在你们说的那样大的距离,没有移动的必要。②再次构筑测量人员简易保护设施土方作业,因天冷作业量大,不移动为好。这真是“秀才遇到兵,有理说不清”。后来还是经钱学森同志以概率论进行了深入浅出的解释,才说服了大家,立刻组织施工。钱学森非凡的语言表达能力,也是从事尖端技术人员必须有的基本功,作为技术人员,应该注意培养。

机关人员告诉我们,聂帅和钱学森同志知道周总理十分关心两弹结合飞行弹道要经过甘肃柳园,对那里的安全要我们作出预计。为此,魏其勇作了概率统计,载原子弹飞行的成功率按置信度为0.6,连续成功11次,可靠度为0.92,介入九院提供原子弹化学爆炸的威力半径,推出落到柳园地区的概率是十万分之六,供领导机关参考。

如果火箭偏北飞行,超出预定的距离,而核武器工作正常,也会构成对测量队伍的巨大威胁。一院试验队发出技术通知单,如火箭关闭发动机点偏北××公里,只能使安全爆炸系统从地面发出爆炸密码,先炸毁原子弹,使之发生化学爆炸,不会产生核爆炸,而后炸毁导弹。这一通知单由基地会签,钱学森看过,聂荣臻同意,由安全军官顿河同志不经请示发出安全爆炸指令,确保测量队伍的安全。

1966年10月19日晚,在人民大会堂福建厅,周总理、叶帅、聂帅和中央机关、部门负责同志听取了来自西北试验基地的汇报,钱学森同志和我作了补充发言。周总理任命了两弹结合试验临时党委成员,聂帅为党委书记。我被安排坐在靠近总理的第二排,听到总理和主要领导交换意见。听到钱学森告诉总理:“……飞行试验有两种失败,一是技术水平不高,现在不能掌握的方案性原理性的失误……另一种是能够做到,但粗心大意没有做到的失败……。飞行失误落入柳园的概率为十万分之六,其安全程度,比总理乘坐荷兰皇家航空公司的飞机,作非洲10国访问的安全性还高,柳园是安全的……。”

周总理同意导弹由技术阵地转场到发射阵地,并提出“严肃认真,周到细致,稳妥可靠,万无一失”的指示,我们既受到鼓舞,又受到鞭策。总理的话,现在已成为航天界的至理名言(参阅“光明日报”1998年4月14日《周恩来总理与我国运载火箭》)。

我们把周总理的指示带到发射基地,两发导弹检测完毕均符合要求,用哪一发来运载核武器,议论纷纷。刘纪原提出选择火箭的标准,经一院试验队党委讨论决定:“上天的产品不但生产历史要清楚,而且是要清白的;产品测试参数不但是合格的,而且是稳定的。”据此大家一致同意10号弹承担运载核武器的任务。次日,聂帅和钱学森到达基地,我向钱学森报告了挑选导弹情况。钱学森说:“大凡高精度的东西,都是同批中挑选装配出来的,再进一步分析高精度的原因,找到误差项,进行误差分离,得到更高精度的惯性器件。”

10号弹载着核武器,突破大气层的热幛,实施了核爆炸。报靶数据送周总理后,总理在即将付印的1966年10月27日《人民日报》号外上,把“命中目标”改为“精确地命中目标”。钱学森率领科技队伍出色地完成为任务,我也深深地记住了钱学森的这几句话。

我在任总设计师,用“长征3号”运载火箭首次执行外星发射任务时,请上海仪器厂徐道平同志用同样方法挑选惯性器件平台。1990年4月7日,我国的运载火箭将外星“亚洲1号”卫星精确送入轨道。美国休斯公司称“这次入轨是H-376卫星30多次发射中精度最高的”。现在这一技术思路,已用于第二代固体战略火箭上,即误差分离技术,提高导弹的散布精度。

钱学森到国防科工委任副主任之后,指示我们要进行一次两弹结合技术协调。1975年5月,我和一院14所王国雄等共20余人去九院,接待我们的有朱光亚、陈能宽、邓稼先,进行战略导弹和氢弹的互相交底和协调。会议结束时,刘西尧部长会见了与会人员,这次会议,为我国战略导弹和核武器奠定了基础。

钱学森就是这样,把自己所学的科学理论与改造客观世界的革命精神结合在一起,把自己的一生,无私地奉献给了中国的科技事业尤其是国防事业。回想和钱老共事的几年,是我深受教诲、不断进步的几年。作为他的部下,我深深地感谢他。在钱老90大寿来临之际,我道一声“钱老,您辛苦了!我衷心地祝您寿山福海,与祖国同茂!”

作者简介:谢光选 1922年生于江西省南昌市。1946年毕业于重庆兵工学校大学部。1960年任火箭总体设计部副主任、主任,1977年任运载火箭技术研究院副院长,1980年任七机部总工程师。1987年为国际宇航科学院(IAA)院士,1991年选聘为中国科学院院士。主要从事液体战略导弹和运载火箭的研制工作,为我国第一个自行设计火箭总体主任设计师。经周总理批准任导弹核武器技术协调组组长,1966年11月,导弹精确命中目标,实施了核爆炸。在任“长征3号”总设计师期间,解决了全箭耦合振动,攻克低温技术。突破了高空失重场(低重力场)第二次起动氢氧发动机的技术难关。1990年以商业发射将“亚星1号”送入轨道。

贯彻五院建院方针的首例

朱　正

1956年4月党中央成立航空工业委员会,5月成立五局下设五院。1956年10月8日正式成立五院。当时五院所在地是原北京军区空军466医院。

五院成立大会是在466医院食堂兼礼堂举行的,聂总亲自参加并宣布五院正式成立,任命钱老为院长,领导大家从事火箭导弹的研究工作。同时聂总宣布五院建院方针是"自力更生,力争外援和利用资本主义国家已有的科技成果",并告诉我们这一方针已经毛主席亲笔批准。

聂总宣布五院的建院方针的背景是:

1956年8月17日中国政府向苏联提出"关于提供全面导弹技术援助的请求",9月13日得到苏共答复拒绝中国政府请求,认为中国当时工业基础和技术人员都不适合搞导弹,所以只同意为中国培训人员和送一枚P-1教学用导弹。

因此,当时有人也认为没有苏联援助,单靠中国自己的力量是搞不成这项任务的,针对这种情况党中央制定了五院建院方针,明确表明党中央决心:即使没有苏联的帮助,也要靠自己的力量把导弹搞上去。五院建院方针正是在这种背景下产生的。

事实上钱老1955年回国,1956年就提出《建立我国国防航空工业的意见书》,受到党中央重视和毛主席接见,并决定由钱老带头来发展中国自己的导弹事业。当时国内确实只有钱老具有导弹的研制经验,而且在弹体气动力学和自动控制两方面都有杰出成就闻名于世,这是促使党中央下决心要自力更生把导弹搞上去的因素之一。

五院成立之初,在没有苏联的帮助下,除了466医院一幢楼房外,一无所有。钱老作为院长遵照建院方针,积极展开五院建院工作,脚踏实地、一步步地开展中国自己的导弹科研工作。

1956年10月8日五院成立之际,只有百余人,技术人员十余人,其余为应届毕业生,来自各大学多种学科,就是没有学导弹专业的,他们不知道自己所学专业与导弹有何关系,因此他们需要对导弹建立一个整体概念,钱老就决定成立训练班,亲自讲授"导弹概论"和航空概论、汽动力学发动机和制导概论等课程。

我是9月16日到五院报到的,钱老就说要开办训练班,他分配我教"制导概论",我说我并不知道制导,他就拿出一本他从美国带回来的1955年出版的"Guidance(美导弹丛书之一)",他说你就照此讲授。我初翻阅一下,内容还能懂,我也就答应下来,当时梁守槃院士任训练班主任,他说五院成立后即将开学,所以我只能边读原著边写讲稿,最困难的是

专用名词无现成译名，要自己创造，Guidance 还是钱老自己译成“制导”的。

训练班结束后，钱老决定建立 10 个研究室（前 5 个室是弹体，后 5 个室是制导）。百余名大学生被分配到各研究室，开始筹建自己的研究室。当时我任计算机室副主任，室里只有两位老科学家和十余名应届毕业生，他们来自不同专业，只是没有学计算技术的，当时计算机室的任务是配合导弹的研制，解决飞行实验的仿真任务。所以室里先教授模拟计算技术，一边找到苏联 МПТ －9 和 МН－7 两台模拟机，建立起国内第一个仿真试验室，并为 1956 年底到达的 P－1 教学导弹的制导系统做了半实物仿真试验。同时开展自己的模拟计算机和各种运算部件的研制工作，并且为地空导弹（“541”）用的九个自由度的仿真作方案论证。

其他研究室也开展各自的筹建工作，只是各室的规模和进展有所不同而已。

各研究室初步建立过程中，钱老又及时提出五院的第一期奋斗目标，研制中国自己的地地导弹和地空导弹“541”。这也是自力更生研制中国导弹的首期目标。当时各研究室也围绕着这个目标开展了各自的预研课题，这是走向自行设计导弹的前奏。

当时我参加了“541”的初步设计，钱老知道起步难，所以在“541”初步设计时只要求两年内能把弹飞上去，而不要求制导一定要准确，他是以实事求是的科学态度来对待新生事物的。通过“541”的初步设计，我为计算机室提出“九个自由度的半实物飞行仿真系统的课题”以配合“541”的研制需要。

当时大家是有信心的，觉得靠自力更生应该能把导弹搞上去。当然，研制过程中必然会遇到一些困难和弯路。德国在 20 世纪 30 年代末到 40 年代初发明创造出导弹，使导弹成为客观存在的实物，中国在 50 年代的科技水平不低于德国 30 年代的水平，只要我们把技术难点罗列出来，按计划预研逐步解决，相信靠自力更生是会成功的，当然当时确有些人怀疑自力更生的原则，认为没有苏联支援就做不出中国自己的导弹。现在回顾起来党中央的决策是英明正确的。

总之五院创建之初，虽然没有苏联支援，钱老坚定贯彻党中央制定的五院建院方针，走自力更生的道路，带领大家积极开创了中国自己的导弹事业。

作者简介：朱正　原航天测控公司总师，研究员。1945 年交通大学电机系电信组毕业并任助教。解放后任华东军区军事科学室副研究员，从事水陆两用遥控炸弹的研究。1952 年任哈尔滨军事工程学院副教授，1956 年调国防部五院，参加建院工作，从事计算机研制和仿真工作。1991 年退休。

钱学森同志领导航天科技创新之路

中国航天科工集团公司

获得“国家杰出贡献科学家”称号的钱学森同志，在回顾他从美国返回祖国后曾满怀深情地说：“我从1935年到美国，1955年回国，在美国待了20年。20年中前三四年是学习，后十几年是工作，所有这一切都是在做准备，为了回到祖国后能为人民做点事。”确实，钱学森冲破藩篱回到朝思暮想的祖国，带回了他对祖国、对人民的一片赤子之情，为创建和发展中国的航天事业倾注了毕生心血，使中国的航天事业取得了壮国威、振民心的巨大成就，做出了卓越贡献。

钱学森回国46年来，在党中央、国务院以及周恩来总理亲自挂帅的中央专委的领导下，曾担任过国防部第五研究院院长、七机部副部长、中国空间技术研究院院长、国防科委副主任、国防科工委科技委副主任、总装备部高级顾问等职务，协助聂荣臻、张爱萍等领导人，满腔热忱地投入到开创中国航天的工程组织、技术攻关和研制发射实践，带领广大科技人员艰苦奋斗，奋发图强，不断取得突破性进展和辉煌成就，使中国航天科技工业跻身于世界先进行列，在国际上占有了一席之地。钱学森在航天领域的贡献是举世公认和无与伦比的，而且是巨大的和多方面的，无论是航天工程的组织管理，还是航天技术的攻关发展，都体现出他艰辛探索、勇于开拓的创新思想和以身许国、顽强拼搏的献身精神，获得了创造性的成就。钱学森领导我国的航天科技工业走出了一条创新之路。

一、航天事业的创建

钱学森根据中国的国情，跟踪世界科技前沿，在经济比较落后、工业基础薄弱的情况下开创了中国的航天事业。1956年初，钱学森回国不到半年，就在周恩来总理的授意和鼓励下，经过短时间的国内参观考察和对国外情况的分析研究，怀着对新中国国防科技事业的强烈责任感，向中央报送了《建立我国国防航空工业的意见书》，详尽地提出了我国火箭、导弹发展的组织方案、研究计划和具体步骤。随后，他又受命牵头和主持起草了《1956至1967年科学技术发展远景规划》中的《喷气与火箭技术的建立》规划方案，同时参加由周总理、聂荣臻元帅领导的航空工业委员会，筹划开展火箭、导弹的研究工作。1956年10月8日，在钱学森回国正好一周年的日子正式成立国防部第五研究院，不久他被任命为院长，在最初争取到苏联的有限援助之后，提出了从仿制起步发展新兴火箭技术的方案。仅经过短短3年多时间，1960年11月5日，钱学森协助聂荣臻元帅和张爱萍将军直接指挥，我国仿制的第一枚近程地地导弹发射一举成功。随后，钱学森参与组织仿制的地空导弹和

海防导弹飞行试验相继传出捷报。这标志着我军装备史上的一个重要转折点,为独立研制和掌握国防所需要的新式导弹武器奠定了基础。

1965年,鉴于国防部五院自行研制和弹道式导弹已经取得突破性成果,中国科学院从1958年开始探索人造卫星研究也有了一定基础,钱学森正式向国家提出报告:“建议早日主持制订人造卫星研制计划,并列入国家计划,促其发展。”这个建议得到党中央批准后,在钱学森的参与组织下,制订了在1970年或1971年发射我国第一颗人造卫星的设想,并提出了运载火箭、人造卫星以及地面测控站的发展计划。1968年组建中国空间技术研究院,钱学森直接领导研制计划的实施,仅经过5年的艰苦努力,1970年4月24日我国第一颗人造卫星发射成功,开创了我国航天的新纪元。钱学森所做的开创性工作,也为以后的洲际导弹、水下发射战略导弹、长征运载火箭、各种人造卫星以及试验飞船的成功发射打下了坚实基础,其中有的项目,钱学森还仍然担负了规划协调和技术发展的组织领导工作。钱学森作为倡导者和缔造者,为我国航天事业的开创和崛起发挥了重要作用。

二、航天技术的突破

钱学森是一位享誉世界、具有真知灼见的科学家,在火箭、导弹、航天技术及其相关科学领域学识渊博,卓有建树,还参与过火箭、导弹的工程实践,积累了丰富的经验。他早年在美国不仅对火箭技术的有关理论有所研究和创见,而且还担任过著名的古根海姆喷气推进研究中心的负责人,具体参加过美国初期导弹的研制工作,取得出色成绩,所以美国人认为他是“帮助美国成为世界第一流军事强国的科学家银河中的一颗明亮的星”。他回国后,倾其全部知识和智慧于发展祖国的航天科技工业,解决了导弹和人造卫星研制试验发射中的许多关键技术问题。许多航天专家和科技人员说,钱学森对技术方向抓得准,对技术关键抓得狠,技术上的许多重大紧急问题都需要钱老把关、掌握。

国防部五院刚成立时,只有钱学森搞过火箭、导弹,他便开班授课,亲自主讲《导弹概论》,撰写了《星际航行概论》,传播研制导弹、卫星的科技基础知识,培养自己的航天科技人员。在组织研制发射的过程中,他深入到研制试验第一线,解决技术难题,攻克技术难关。1960年在仿制的“1059”导弹进行发射试验时,由于加注推进剂操作不当,使弹体瘪进一块,大家都不知道这一现象对发射有无影响,而钱学森由于过去做过壳体的研究,认为这是试加注推进剂时,泄出后未开通气阀造成箱体内真空,由外部空气压力把箱体压瘪。只要发动机点火后弹体内压力就会升高,箱体将会恢复原状,因此发射不致出现问题。他主张照常发射,结果取得成功。1964年我国第一枚自行设计中近程导弹飞行试验成功后,在钱学森的领导下,改进导弹的战术技术性能,使射程、精度、使用性能符合运载核弹头的实战要求,在进行“两弹”结合的研究试验中解决了许多技术难题。1966年10月,又协助张爱萍将军指挥“两弹”结合飞行试验获得成功。1966年后在组织研制发射第一颗人造卫星的运载火箭中,出现了某种异常现象。钱学森在现场观察了整个试验过程,组织大家讨

论后,他胸有成竹地做结论说:“这种情况是近乎失重下产生的,此时流体已成粉末状态,动力很小,不会影响火箭的正常飞行。”后来的飞行试验证明,这个结论是正确的,从而解决了发射卫星中的这个疑难问题。这些技术上解惑排难的事例很多,充分展示了钱学森丰富的知识和技术功底。他确实为我国“两弹一星”技术的突破和航天技术的拓展,建树了不朽的功绩。

三、航天管理的创新

钱学森在马克思主义理论的指导下,运用辩证唯物主义思想,将独创和学习外国的先进管理经验结合在一起,构筑了中国自己的航天管理体系。航天不仅是当代的一项高新技术,而且也是一个庞大的工程技术,规模宏大,技术复杂,涉及面很广,钱学森创造了系统工程的概念和方法。他贯彻“自力更生为主,力争外援和利用资本主义已有的科学成果”的方针,最初通过仿制到自行设计,采取由低到高,由小到大,技术由简单到复杂,导弹由近程到远程,火箭由液体到固体,由弹道式导弹到运载火箭,由低轨道、小重量卫星到高轨道、大重量卫星,再由人造卫星到载人飞船,按照科学技术的发展规律,从系统工程的观点循序渐进,从而在航天科技工业领域不断取得一个接一个的成功。

在实际工作中,他充分发挥社会主义制度的优越性,将周总理、聂老总倡导的革命战争中组织大规模作战的办法,有效地用到航天工程的研制上来,依靠各个方面的大协作,把广大科技人员的积极性调动起来,集中兵力打歼灭战,大力协同,集智攻关。从最初的“1059”工程、“651”工程到后来的“851”工程、“331”工程、“长二捆”工程、“921”工程等,都采用了钱学森大力倡导的系统工程办法,将航天科技堡垒一个一个地攻下来。

钱学森还把民主集中制的原则运用到航天科技工业的管理,在技术上既充分发挥民主,善于听取各方面的意见,集思广益,又高度集中,服从总体,树立总设计师的权威,在统一指挥调度下各负其责,互不推诿扯皮,共同克服困难,完成任务。钱学森在回答中国航天发展有什么经验的问题时,惟独写了坚持“民主集中制”这一条。他本人对此就认真贯彻,身体力行,重视和科技人员共同商讨技术问题,吸取正确的意见。在钱学森周围聚集了一批航天专家和科技人员,老一代的航天专家有任新民、屠守锷、黄纬禄、梁守槃、庄逢甘、梁思礼、谢光选等,第二代航天专家有宋健、孙家栋、王永志、王德臣等,他和老一代专家常在一起探讨重大技术问题,充满了生动活泼的学术气氛,共同提出航天科技发展的全局性问题;他和第二代专家的关系也十分融洽,总是善于听取和采纳他们的建议和意见,鼓励他们的创造性成绩;他甚至经常接触广大的年轻科技人员和工人,从他们的工作中汲取丰富的营养,修正和完善每一个方案,然后正确决策,使航天研制工作不走弯路。

钱学森重视借鉴国外管理的先进经验,创造出适合中国国情的管理体系。他最先把美国研制“北极星”导弹采用的PERT计划协调管理技术引荐进来,结合“1059”工程、“651”工程的实际,总结了一套系统工程的管理模式。这种系统工程的管理办法在航天工程的

研制中十分有效，现在已经推广运用到其他领域的大型工程建设中去了。

四、航天精神的弘扬

钱学森在领导组织航天技术的发展中，具有严谨的科学态度、朴实的工作作风，表现出艰苦奋斗、淡泊名利、无私奉献、不畏困难的优秀品格和高尚精神。1962年3月，当我国第一枚自行设计的中近程导弹飞行试验失败后，钱学森感到十分痛苦，但他不灰心气馁，而是用自己过去切身的感受，鼓励大家振作精神，分析原因，采取措施，改进设计，加强试验，排除故障。当经过两年的努力，1964年6月再次发射这种导弹发射成功后，钱学森则又向下一个目标努力攀登了。

在我国火箭、导弹创业最艰苦的日子里，钱学森挑起重担，历尽艰辛，克服困难，甚至奔赴连火箭、导弹设计专业人员也很少去过的弹着区了解情况，和科技人员一起餐风露宿、日夜兼程，一心扑在研制试验的第一线。在短短十年时间就突破"两弹一星"技术，使我国跻身于世界强国之列。他谦虚谨慎，严于律己，默默地贡献自己的力量。他热情扶植和培养中青年科技人员，曾经对青年科技人员提出火箭发射时发生"气化"而泄出部分推进剂不影响射程、解决远程火箭受国内靶场射程的局限进行飞行试验的难题等意见倍加赞赏，给予热情支持，甚至对一些不知名的科技人员做出的一点不为人注意的成绩也十分关注，热情地写信给予鼓励，而且表示要学习他们的创新精神，还经常把荣誉让给他们。他说："如果我没有跟同志们在一起，受同志们工作、意见的启发，我也不可能做出这些成绩"。钱学森总是把航天事业的一切成就归功于党，归功于集体，归功于广大科技人员和工人，把自己比喻为"只是沧海之一粟，渺小得很"，表现出一个科学家的博大情怀。

钱学森在领导攀登航天高峰的征途上，还体现勇于开拓进取，锐意创新的精神。他在攻克研制第一个系统，第一个工程的基础上，总是富有远见，考虑提出下一步开拓的新领域和新目标，鼓励科技人员走科技创新之路。例如，他积极支持和推动及早开展固体发动机、氢氧发动机、火箭捆绑技术等的研究，从而促进了固体战略火箭、大推力运载火箭的诞生，不断把中国的航天技术提高到新的水平。钱学森是弘扬航天精神和"两弹一星"精神的杰出典范。

钱学森率领我们向航天科技工业进军已经整整45年了，不管他是在第一线组织指挥，还是退居二线关注指导，在各个方面都为我们树立了榜样。他带出了一支思想过硬、技术精良、顽强拼搏、善于攻关的航天精神和"两弹一星"精神的队伍。我们中国航天科工集团公司的12万职工正是在钱学森等老一代航天人影响和带领下成长壮大起来的一支队伍，无不为钱老在航天事业上取得的卓越成就而感到骄傲和自豪。我们集团公司有决心和信心在江泽民"三个代表"重要思想的指引下，学习钱学森的优秀品格，发扬他的高尚精神，沿着以钱学森为代表的老一辈航天人开辟的航天创新之路继续前进，为我国的国防现代化和国民经济建设做出新的更大的贡献。

德高望重　功勋卓著

中国航天科工集团公司第二研究院

钱学森同志是我国优秀科技工作者，老一辈杰出的导弹技术专家。他为我国科学技术、特别是国防尖端科技事业的创建与发展做出了巨大贡献，曾被党中央、国务院、中央军委授予“国家杰出贡献科学家”荣誉称号和“两弹一星功勋奖”。在钱老九十寿辰之际，我们二院全体干部、职工向钱老表示热烈祝贺！同时深情回顾钱老热爱祖国、发展航天，以及对我们二院成长壮大所付出的心血和贡献。钱老他那献身科学、开拓创新的精神，永远值得我们尊敬和学习，并将不断激励我们新老科技工作者继续奋进和取得新的辉煌成就。

一、热血报国

20世纪30年代中期，以钱学森为代表的一批爱国热血青年，怀着“科学救国”的远大理想赴美国学习先进的科学和工程技术，他先在麻省理工学院获得硕士学位，后拜世界著名的“空气动力之父”、也是美国“火箭之父”的加州理工学院教授冯·卡门为导师，在美国留学期间，作为受列强宰割的民族，他饱受种种歧视和不公正的待遇，但他发奋刻苦学习，以优异成绩和才华赢得了冯·卡门等美国著名科学家的青睐，成为古根海姆航空实验室火箭研究小组的重要成员。他发现了宇宙航空动力学中的S推动力，以及他在空气动力学方面诸多开创性贡献，使他成为加州理工学院最年轻的教授、冯·卡门在火箭研究方面最得力的助手、空气动力学发展不可缺少的奠基人。他们的火箭研究技术对美国在“第二次世界大战”中打击法西斯、争取世界和平起到了关键作用，因而受到了美国总统罗斯福的接见与鼓励，并授予钱学森等人“二战和平勋章”。

正当他们事业处于最高峰的时候，《东方红》的乐曲声中传来了新中国成立的消息。一群群留学生和中国教授含着泪水收听了《开国大典》中毛主席的声音：中国人民从此站起来啦！他们纷纷向美国政府提出回国要求。使美国政府感到十分不安，并决心阻止钱学森等一批爱国科学家回国。美国海军次长预言：如果让钱学森回国，就等于把几个现代化装甲师拱手送给中共！美国联邦调查局的特务们以“非法移民罪”逮捕了钱学森，并关进了一个孤岛——特米那岛的监狱，怀着身孕的妻子为救丈夫险些流了产。

钱学森被捕的消息震惊了世界，美国国内众多科学家和大学教授联名向美国政府提出抗议，冯·卡门拖着病躯奔走于美国高层人士间，并以“脱离美国”为抗议，向美国新任总统杜鲁门施压，以便早日救出被关押的钱学森。钱学森被美国政府迫害的消息传到了刚刚建国不久的中国，周总理通过外交斗争，在“日内瓦谈判”中，用美国被俘飞行员作为条

件要求美方释放钱学森回国，在正义力量的压力下，在朝鲜战争中遭受失败的美国总统艾森豪威尔不得不下令释放钱学森。钱学森等几位著名科学家及其家人于1955年底终于获得了自由，回到了阔别20多年的祖国，并受到了毛主席、周总理等中央领导的热情接待！当年他们冲破层层封锁回国效力的拳拳赤子之心，已成为中国科技界的楷模。

二、艰苦创业

为了迅速改变我国科学技术的落后面貌，1956年1月毛泽东主席在最高国务会议上提出："我国人民应该有一个远大规划，要在几十年内，努力改变我国在经济上和科学文化上的落后状况，迅速达到世界上的先进水平"。在毛主席重要指示的鼓舞下，钱老于1956年2月满怀激情地向政府提出了《建立我国国防工业意见书》，并受到了高度重视。同年春，在周恩来总理和陈毅、李富春、聂荣臻副总理的领导和组织下，制定了《1956～1967年科学技术发展远景规划纲要(草案)》，提出了"重点发展、迎头赶上"的方针，确定了57项重点任务，喷气和火箭技术在规划纲要中具有突出的地位。同年5月，党中央批准了聂荣臻副总理关于《建立我国导弹研究工作的初步意见》，决定创建导弹研究院。1956年10月8日，我国第一个导弹(火箭)专门研究机构——国防部第五研究院(以下简称五院)成立，由钱学森同志担任院长，主持全面工作。

1957年10月15日，以聂荣臻副总理为团长的中国政府代表团在莫斯科与以别尔乌辛为团长的苏联政府代表团签订了苏联在火箭和航空等新技术方面援助中国的协定(以下简称中苏两国10月15日协定)。为了做好迎接苏联援助项目的准备工作，五院院长钱学森、政委谷景生、副院长王铮于同年11月9日向聂荣臻副总理呈送了《关于导弹研究院的体制意见的报告》。报告中提出"以电子科学研究院为基础，与五院后五室合并组成二分院，院址在(北京)永定路财务学校"，其任务是负责地地、地空和飞航式导弹控制系统的设计工作。随后，电子科学研究院正式划归五院。1957年11月16日，周恩来总理任命王铮为国防部五院副院长兼二分院院长。从此，国防部五院二分院——导弹控制系统研究分院正式成立，并开始了一系列组建与调整工作，为型号仿制和工程研制创造了条件。

1958年4月，五院下达了仿制"P－2"的任务(代号为"1059"，以后根据我国地地导弹命名序列，"1059"正式定名为"东风1号")，要求1959年10月1日完成仿制，向国庆十周年献礼。为此，五院党委召开了四级干部会议，重点研究了"1059"的仿制问题，并对如何处理学习与研究、仿制与独创的关系进行了认真的讨论，统一了领导骨干的思想。二分院主要负责控制系统的仿制任务，在两级党委和全体科研与管理人员的共同努力下，经过三个阶段和两年零六个月的苦战，于1960年11月5日获得首发飞行试验成功，12月6日和12月16日又分别进行了两发遥测弹飞行试验，均获得圆满成功。其后，分院于1962年9月至1964年2月完成了"1059"01批控制系统小批生产任务，至此"1059"的仿制工作全部结束。同时，中央军委决定仿制"C－75"地空导弹武器系统(代号"543"，后定名"红旗1号")，二分

院主要负责反设计和技术抓总工作,这是一项十分艰巨的任务,技术复杂、参加单位多,再加上三年自然灾害和前苏联撤走专家,中断了一切援助,可以说是困难重重。但在党中央、国务院和中央军委的亲切关怀下,在聂荣臻元帅和钱老等五院领导的直接指挥下,以及各工业部门大力配合下,二分院内部多次调整与集中力量,才克服了种种困难,解决了一个个技术关键问题。从1958年6月明确任务到1964年12月导弹初步定型;1965年6月制导站和地面设备初步定型,开始小批量生产,装备部队;1965年7月,钱老亲自指派二院二十三所陈敬熊负责组织攻关小组,解决"红旗1号"制导站天线误差问题,到1966年6月完成任务,其攻关成果荣获国家发明一等奖。至此整个武器系统仿制成功,为加强我国防空力量做出了贡献。

三、硕果累累

1960年8月,当苏联专家全部撤走之后,"1059"仿制即将成功之际,聂荣臻副总理在五院高级知识分子座谈会上的讲话中指出:我们"现在就要前进到自己独立设计阶段。自己研究,自己设计,自己制造,当然要比仿制难得多,但是这一关非过不可。"他号召五院的同志要"自力更生、发奋图强、争一口气,突破从仿制到独立设计这一关,迅速发展提高,建立我们自己的高度技术水平的导弹技术体系。"这一指示充分表达了广大科技人员、工人和干部的强烈愿望。从此,各型号自行设计和研制相继展开,二分院仍然承担"东风2号"、"东风3号"等地地型号控制系统研制工作。当"东风2号"自行设计出现问题和首发失败时,钱老等五院领导都亲临现场,鼓舞大家说:"我们是第一次自行设计,难免不成熟,要经得起挫折的考验"。并组织攻关小组,深入总体设计部与技术人员一道共同商讨对策。同时充分发挥广大科研人员和技术工人的聪明才智,经过多年努力,圆满完成了"东风2号"、"东风3号"等地地型号及其配套研制生产任务,为按时定型和装备部队做出了贡献。

从1960年10月到1964年底,我国地空导弹部队掌握了新技术、新战法,先后共击落U-2飞机和无人驾驶飞机9架。1965年1月10日,又用"红旗1号"国产导弹,击落一架入侵华北地区上空的敌U-2飞机,可以说是战果辉煌,成绩显著。但通过对多次战例的分析研究,人们清楚地认识到"红旗1号"地空导弹武器系统面临着严重的电子战形势,必须加紧研制抗干扰能力强的地空导弹武器,这就是"红旗2号"研制的时代背景。"红旗2号"是在"红旗1号"的基础上改进设计的地空导弹武器系统,早在1963年开始进行方案准备,1965年1月4日,国防部第五研究院改为第七机械工业部,调整了科研和生产的归属,从而在组织上、技术上和生产管理上为研制新型号创造了有利条件。同年4月,七机部分别在二院和京西宾馆召开了"红旗2号"方案审查会,研究制定了"红旗2号"方案,明确了研制分工,决定由七机部二院负责抓总研制。要求在"红旗1号"基础上,提高抗干扰能力,扩大作战空域,改善操作使用性能,为此二院相应采取了21项技术措施,上报钱老修改审

定。从确定方案到完成定型试验,在各方面的共同努力下,特别是在关键时刻,钱老等主要领导都要深入科研生产第一线,亲自授课,培养了一大批科研技术骨干,攻关破难,艰苦奋斗,从而克服了种种困难和"文化大革命"中的严重干扰破坏,仅用了一年多的时间就完成了"红旗2号"研制试验任务,于1967年6月经军委第77次会议决定并经毛泽东主席和周恩来总理批准,同意"红旗2号"定型,投入批量生产,装备部队。同年9月敌U-2飞机入侵我华东地区时,尽管使用了转播干扰手段,仍被我"红旗2号"导弹一举击落,有力地捍卫了祖国神圣的领空,此后美蒋不得不停止了U-2飞机对我国大陆的侦察飞行。"红旗2号"的研制成功,不仅解决了我国地空导弹的有无问题,而且也标志着我国地空导弹研制队伍已经成长壮大,独立自主地发展我国的地空导弹事业已有良好的基础,并为后续多种型号研制创造了有利条件。

钱老不仅是空气动力学方面的泰斗,为我国航天事业的发展和科技创新做出了巨大贡献,而且在系统工程和控制论方面也有很深的造诣,这对于航天和武器系统这类大型工程项目的顺利实施和科研生产体系的形成,也具有极为重要的指导作用,并在我院40多年的发展变化中得到了广泛推广应用。在各方面的共同努力下,我们先后完成了6个型号定型装备部队,4个型号正在进行批量生产,3个型号在研,3个型号预研,实现了生产、研制和预研的良性循环,为部队提供了更多的精良武器装备。在完成型号研制任务的同时,我们还紧密结合地地、地空型号研制生产中的关键技术,在国防科工委、总装备部、国家科委、航天总公司的统一规划和支持下,进行了大量预先研究,并获得了开创性进展,获奖成果达2 000多项,有力地促进了型号研制和专业技术的发展,以及军民两用技术和科技成果转化工作的推进,为中国航天导弹技术的发展和国防实力的加强做出了重大贡献。当年钱老辛勤开创的事业已经枝繁叶茂,硕果累累。在钱老九十大寿之际,仅以我们所取得的成绩向钱老汇报和表示无比的崇敬与衷心的感谢!我们将继续按照钱老的宏愿和时代发展的要求为国防和国民经济建设做出更大的贡献。

钱老和中国的飞航导弹

中国航天科工集团公司第三研究院

钱学森的名字和中国的火箭、导弹、卫星事业紧密相联。从地地导弹到防空导弹，我国步入了导弹研制大国之列；从运载火箭到人造卫星，我国成为世界航天俱乐部的成员，跻身于为数不多的航天大国之列。钱老以对祖国、对人民的无限忠诚，满腔热忱地投身于国防科研事业，做出了卓越的贡献，成为我国知识分子的杰出代表，是我国科技工作者的楷模。

我国的飞航导弹发展起步同样和钱老有着密切联系。钱老是我国飞航导弹事业的奠基者之一。从国防部五院到第七机械工业部，钱老贯彻国家关于发展我国飞航导弹的方针政策，组织领导了中国飞航导弹的开创和发展历程。从制定第一个发展规划，安排岸舰导弹的研制生产到组织远景型号的论证和关键技术的预先研究，钱老对中国飞航导弹的发展做出了开创性的贡献。今天，当钱老九十华诞之际，回首钱老对发展中国飞航导弹的教诲，对我们研制新一代飞航导弹仍有很大的现实教育意义。

一、在党的领导下开创导弹事业

钱老于1955年冲破重重阻力回到祖国，国防部长彭德怀接见他，谈到了中国要发展导弹。副参谋长、(哈尔滨)军事工程学院院长陈赓问钱老："中国能不能搞导弹?"当时我国工业基础薄弱，科学技术尚十分落后，发展尖端导弹技术对有些人来说，想都缺少勇气。党中央以非凡的胆略和战略眼光，坚决依靠像钱老这样的专门人才，从而在作出发展原子弹的决定之后，又作出了发展导弹技术的决定。在周恩来总理的启示下，钱老于1956年2月17日提出了《建立我国国防航空工业的意见书》，从领导、科研、设计、生产等方面，提出了全面具体的实施方案。3月14日周恩来总理召开专门会议，组织建立了第五研究院，制定了发展各类导弹的规划。在周恩来和聂荣臻的领导下，钱学森洞察军事科技发展方向，把握国防科研的关键，从战略高度提出并实践了尖端武器的发展方针和技术途径，奠定了成功的发展基础。

钱老的赤诚之心感人肺腑。在导弹事业的初创时期，亟待大批科技人员奋力拼搏，无私奉献青春年华。钱老现身说法(自己36岁结婚)鼓励年轻人晚婚，多掌握科技知识和一门以上的外文，以献身国防科学技术，掌握尖端的导弹技术，为国家做出贡献。

二、强调技术创新和科研与生产相结合

我国的飞航导弹是从引进仿制反舰导弹开始的。1959年从苏联引进了舰舰、岸舰等

导弹资料和样品。国防部五院承担设计任务,由航空部门安排仿制生产。五院组织科技人员下厂,参加仿制和技术培训。20世纪60年代初,时值国家困难时期,天灾人祸,“反华大合唱”,封锁禁运,“朋友”的背信弃义,一股脑降临下来。飞航导弹的研制生产面临十分严重的困难局面。我国人民在党的领导下,同仇敌忾,发愤图强,经过调整精简,集中力量于舰舰导弹的仿制生产。1964年党中央提出了“要赶一赶海防导弹”的要求,明确要求要研究打掉敌方的海空优势问题。1965年国防工办遵照中央部署,委托钱学森主持召开研究发展岸舰导弹的“423”会议。发展岸舰导弹可以增强海防实力,抗击敌方的海上入侵。钱老特别强调五院科技人员要和工厂搞好三结合,深入生产第一线,拜工人为师。他灵活应用毛泽东思想,指导科研生产,发挥科技人员的积极性,克服困难,寻求多快好省发展飞航导弹的途径。这对于在以后的发展中坚持科研生产一体化的管理模式有着深远的影响。正是由于科研和试制生产的紧密结合,信息反馈快而准确,处理及时,有力地保证了各种问题的顺利解决。尤为重要的是科技人员深入了解工艺生产问题,了解国内工业基础状况,更利于从实际出发,技术方案得以实现。有了下厂参加仿制的实践,深入进行反设计(现在也称逆向工程),培养锻炼了第一批飞航导弹科技人员,使他们懂得了如何结合国情,充分利用现有条件,求得总体上满足性能要求,这是系统工程方法的应用。钱老以其名著《工程控制论》进一步建立起了“系统工程学”,指导飞航导弹的发展。三院得益于钱老认真地、创造性地贯彻党中央的方针,强化系统工程管理思想和生产实际密切结合进行技术上和管理上的创新,少走了不少弯路,创出了自己的经验,走出了引进仿制、改型提高和创新发展的成功之路。

三、为部队提供必要数量的装备

三院初建时,我国仅有数十发的导弹生产能力。众所周知,20世纪60年代国际形势严峻,使我国处于临战状态,对导弹装备要求十分迫切。虽然已开始建设“三线”,但种种原因所致,很难形成批产能力。当时美国侵略越南的战争正酣,而且危及我国安全。钱老从全局思考问题,他按照对付敌方运输船队的需要,向周恩来总理报告,为尽快拿出装备,需在一线扩建生产线,这可在两年内实现批量生产而装备部队,以解决战备的燃眉之急。经周总理批准,实施了有影响的“730”工程,在一线建立了具有数百发生产能力的批量生产线。能够有此决策,体现了钱老深入实际的工作作风。他了解全局情况,十分尊重和相信工人群众的积极性,时经一年多就建成了一条生产线。

钱老以其崇高的爱国热情,把国家大局和实际工作紧密结合起来,他审时度势,提出有悖于常规思维、颇有几分风险的建议。他缜密思考,严谨论证,其巨大的说服力令人信服。这和我们有些人总是四平八稳,不敢办有风险、有困难的事形成鲜明对照。钱老以他过人的智慧为我们树立了光辉的榜样。要勇于进取,永远把国家和人民的利益放在第一位。时代永远是呼唤能审时度势、敢于创基拓业的人!在改革开放的今天,回想钱老的思

维方法,对我们不是有着深刻的启迪吗?

四、寄希望于年轻人,志在争先

1965年以后,钱老用了不少的精力关注飞航导弹事业的发展。他和梁守一起,极力支持冲压发动机的发展,为发展超声速的反舰导弹奠定了动力基础。

当三院率先研制超低空、超声速的反舰导弹时,遇到远程探测的难题。1967年11月23日,在一次方案研讨会上提出了研制超视距雷达的课题。而当时三院的雷达技术人员多是1965年毕业的大学生,仅有两年工龄,又如何面对这项国际上尚无先例的尖端技术呢?钱老热情地鼓励年轻人,要"初生牛犊不怕虎",他颇富哲理地指出,不是做幼稚无知的初生之牛,要努力掌握精湛的知识去攻占超视距探测的高峰。

"要搞使敌人怕的……"这是多么深邃的考虑,这是争创一流、志在争先的精神力量,是后来形成航天传统精神的基础。勇于攀登,是钱老为国家、为中华民族争光的一贯思想和精神的体现,对于三院人的影响是深刻的,一直成为三院人坚定信心和奋斗的崇高目标。钱老身体力行,以他的光辉典范教育、影响着从事飞航导弹的三院人。三院培育、创立了"团结奋进、负重拼搏、科学求实、敢为一流"的"海鹰精神",其中渗透着钱老的教诲和激励。

钱老还对高校的年青教师,社会上做出了于人民有益的事的年轻人寄发了他热情洋溢的信,十分令人感动。

1993年,三院的技术人员汇集了《均匀设计》和《均匀设计应用条例论文选》,钱老作了题词:"理论方法都是死的,而客观实际是活的,千变万化。所以理论与实际要结合,就必须审时度势,灵活运用。此为成功之要诀。"对"均匀设计",他认为"很重要,应推广"。

钱老对科技人员、对部属、对同事,总是寄予深切的期望,对很多同志都给与十分自然亲切的关心,这是他人品中崇高境界的一部分。他稳健的作风、强烈的事业心深刻感染和鼓舞着我们。当此钱老九十寿辰之际,谨以此文表达对钱老的敬意,并决心以钱老为光辉典范,继续谱写三院发展的新篇章,再创中国飞航导弹事业的辉煌。

钱学森与中国卫星事业

中国空间技术研究院

1991年10月16日,国务院、中央军委授予钱学森"国家杰出贡献科学家"荣誉称号。在隆重的授奖仪式上,江泽民总书记发表了重要讲话,他指出:"钱学森同志是我国杰出的科学家,在国内外享有很高的声誉。他在技术科学的许多领域做出了卓越的贡献。特别是在老一辈无产阶级革命家的领导下,钱学森同志以他渊博的知识和对人民事业的热忱,在组织领导新中国火箭、导弹和航天器的研究发展工作中发挥了重要作用。"江泽民总书记的讲话高度概括了钱学森的杰出贡献和重大成就。钱学森成功地组织领导了中国卫星事业的开创、建设和发展,是他杰出贡献和重大成就的重要组成部分。

一、提出并参与制定我国人造卫星发展规划

1958年5月17日,毛泽东主席在中国共产党八大二次会议上提出:"我们也要搞人造卫星"。同年8月21日,中国科学院把研制人造卫星列为重点任务,成立了以钱学森为组长的"581"领导小组,负责组织实施空间技术发展规划和业务领导,首次提出了我国空间技术发展早期的设想蓝图。当时,全国正处在"大跃进"之中,从实际出发,为了国防的急需只能优先保证导弹、原子弹的发展,调整了空间技术的发展任务。1963年1月,中国科学院成立了"星际航行委员会",钱学森参与了领导工作,组织制定了星际航行发展规划,安排了各项空间技术的预先研究课题,为我国空间技术的早期发展做出了大量开拓性的工作。

1965年1月8日,担任七机部副部长的钱学森分别向周恩来总理和聂荣臻副总理呈送报告,提出我国研制人造卫星的条件已经具备,建议制定我国人造卫星研制计划。报告得到聂荣臻副总理的赞同,国防科委组织专家作了可行性专题论证,于4月29日正式向中央专委呈送报告,提出于1970~1971年发射我国第一颗人造卫星的设想,以及研制和发射人造卫星的意见 。5月初,中央专委批准了这个报告,并将卫星研制任务列入国家计划。同年8月,中央专委原则同意中国科学院提出的发展人造卫星的规划方案和第一颗人造卫星在1970年左右发射的安排。从此,中国人造卫星事业进入了有计划的工程研制时期。

二、领导创建中国空间技术研究院

1967年初,根据我国空间技术发展的需要,聂荣臻副总理向中央提出了组建空间技术研究院的建议。同年6月经中央军委批准同意,责成国防科委负责组建工作,为此成立了

“国防科委651筹备处”。同年11月，国防科委召开了体制会议，会议领导小组由钱学森、常勇等10人组成。会议确定中国空间技术研究院为中国空间技术的研究中心，明确了建院的指导思想、基本职责、主要任务、组建方案、组织编制等。

1968年2月20日，中国空间技术研究院正式宣告成立，钱学森兼任院长，列入军队编制，由国防科委直接领导。在钱学森院长和常勇政委领导下，积极推进全院组织结构的建设，除院部机关外，还组建了空间飞行器总体设计部、控制工程研究所、无线电技术研究所等7个部所以及1个试验站和3个试验工厂等单位，使研究院成为一个基本配套的研制航天器的主体单位。建院初期，研究院一直处在边研制、边建设的局面，在进行组织机构建设的同时，建设了急需的专用生产线和试验设施。

钱学森在领导创建中国空间技术研究院的过程中，特别强调运用系统工程的方法和借鉴国防部五院建立总体设计部的经验，组建了研究院的总体设计部，即空间飞行器总体设计部。他直接指导总体设计部的组建工作，确定总体设计部的主要职责、组建方案和主要领导人选等。实践证明，总体设计部成功的组建和运作，对中国空间技术研究院建设和发展发挥了重要作用。钱学森兼任院长3年，对中国空间技术研究院的创立和早期建设做出了开创性的贡献。

三、领导我国第一颗人造卫星的研制和发射

1965年10月至11月，中国科学院接受国防科委的委托，召开了我国第一颗人造卫星方案论证会议，提出第一颗卫星为科学探测试验卫星，并初步确定了卫星总体方案。随后，发射卫星的目的和任务发生了变化。卫星各分系统的技术状态不稳定，整个卫星研制工作难以转入工程实施阶段。1967年初，中央提出第一颗卫星要保证播放《东方红》乐曲，争取一次发射成功。同年10月，国防科委召开了第一颗人造卫星方案修改论证会，会议由钱学森主持，提出第一颗卫星应为工程试验卫星，审定了简化修改后的卫星总体方案。1968年1月，国家批准了我国第一颗人造卫星——“东方红1号”的总体方案和研制任务书，并列为国家重点工程。

中国第一颗人造卫星的研制工作是在工业基础和科技水平比较落后，人力和财力相对匮乏的十分困难的条件下进行的，又正值文化大革命时期，起步艰难、困难重重、问题迭出。在老一辈无产阶级革命家的领导下，钱学森组织领导了第一颗人造卫星的研制和发射工作，在解决我国第一颗人造卫星的研制和发射的重大技术问题上，发挥了决策和指导作用。他主持或参加主持了多次卫星研制工作的重要会议，对各种重大工程技术问题做出了重要决策，他还经常深入科研生产第一线，指导解决一些关键性技术问题。钱学森先后3次带队向周总理汇报卫星研制情况和卫星发射准备情况，在周总理的坚决支持下，解决了不少当时带有政治性的技术问题，排除了无端的干扰，保证了卫星研制工作的顺利开展。

他先后4次亲临酒泉卫星发射场，指导和检查卫星发射试验，领导科技人员排除和解决了很多故障和问题。在卫星发射前夕，1970年4月23日晚上，钱学森在发射任务书上郑重地签下名字，同时上报中央军委和毛主席。经毛主席批准，4月24日卫星成功发射。我国第一颗人造卫星研制和发射成功，在我国航天史上具有划时代的意义，是我国发展航天事业的一个良好的开端。钱学森以他对事业的高度热忱、渊博的知识、超人的智慧、顽强的意志和科学的组织管理能力，在异常困难的条件下，成功地组织领导了中国第一颗人造卫星的研制和发射工作，让“东方红”乐曲响彻太空。

四、培养我国第一代人造卫星技术专家

钱学森一贯重视并积极培养我国空间技术人才。自1961年6月开始，中国科学院举办了由钱学森等3位科学家主持的星际航行座谈会，在3年中先后召开12次会议，钱学森多次讲授了星际航行知识，许多科学家和中青年科技人员参加了这些学术活动。1962年初，他在中国科技大学开设并亲自讲授了星际航行概论专业课程，在此基础上，于1963年初编写出版了《星际航行概论》。该书是我国影响很大的第一部航天技术学术专著，大量年轻的科技人员是通过学习这部专著才投身于航天事业的。1963年9月，钱学森连续半年多指导原上海机电设计院4位年轻科技人员的专业课程，并带领他们参加其他学术活动，原上海机电设计院于1964年初以他们为骨干成立了卫星技术研究室。

在组建中国空间技术研究院之际，钱学森大胆启用和培养年轻人才，推荐年仅37岁的导弹总体设计专家孙家栋出任第一颗人造卫星总体设计和卫星总体设计部的技术总负责人。在钱学森的指导下，孙家栋与钱骥、杨嘉墀、王希季等专家和闵桂荣、戚发轫等众多青年科技人员经过艰苦奋斗，完成了我国第一颗人造卫星的研制和发射任务，在实践中培养和造就了我国第一代人造卫星技术专家群体。

五、指导我国人造卫星技术的未来发展

中国卫星研制工作经过40多年的艰苦奋斗，以较少的投入，在较短的时间里，走出了一条既适合本国国情又有自身特点的发展道路，并且取得了一系列重大成就。21世纪将是世界航天活动蓬勃发展的新世纪。中国根据国家的发展需求和长远目标，制定了面向21世纪的航天发展战略和规划，以加快发展航天事业。卫星技术作为航天事业的重要组成，21世纪将如何发展，钱学森站在国家整体发展的战略高度，对此做出了重要论断。

1990年8月14日，钱学森发表了题为《要从整体上考虑并解决问题》的重要文章，提出了关系到我国社会主义建设的4个问题，其中第二个问题是“要研究如何把人造地球卫星技术用于建立21世纪的社会主义中国”的问题。他指出：“关于人造卫星技术怎样为21世纪社会主义中国的建设服务的问题，我觉得要研究。我建议，要用社会系统工程的方法来研究这个问题”。这一重要论断，要我们高度重视人造卫星技术在我国21世纪现代化

建设中的特有的巨大作用,必须要用社会系统工程的方法来认真研究和努力实践,使其发挥越来越大的作用。

1999年9月18日,中共中央、国务院、中央军委在人民大会堂举行大会,隆重表彰我国研制"两弹一星"的功臣,钱学森等23位科学家获得"两弹一星功勋奖章"。江泽民总书记在表彰大会上的讲话中指出:"两弹一星的伟业,是新中国建设成就的重要象征,是中华民族的荣耀与骄傲,也是人类文明史上的一个勇攀科技高峰的空间壮举"。钱学森为中国卫星事业的创建与发展做出的杰出贡献,将与他的其他杰出贡献共同载入中华民族的文明史册。

参考文献

1 魏根发,祁淑英.钱学森.石家庄:河北少年儿童出版社,2001
2 《当代中国的航天事业》编辑委员会.当代中国的航天事业.北京:中国社会科学出版社,1986
3 《当代中国的国防科技事业》编辑委员会.当代中国的国防事业.北京:中国社会科学出版社,1992
4 钱学森.要从整体上考虑并解决问题.人民日报,1990-12-31

钱学森论科学技术业

黄顺基

21世纪知识经济时代的来临,进一步证实了马克思的光辉论断:科学技术是推动历史前进的有力的杠杆,是推动经济发展的革命力量。面向当代世界发展这一新的形势,我们的战略决策是什么?根据社会主义的根本任务是发展生产力,根据科学技术是第一生产力的观点,钱学森同志认为,当前国际间的竞争主要依靠的是科学技术,基于这样一种形势,"我们必须把科学技术工作摆到一个非常重要的位置上。"为此,他向党中央建议:"建立我国的一种第四产业——科学技术业,作为今天的一项重大的战略决策。"钱老关于科学技术业的设想如下。

一、科学技术业是知识经济时代的战略产业

20世纪中叶兴起的新产业革命突破了工业革命时代的产业结构,出现了第四产业,由此引发世界经济结构的大调整。关于第四产业的问题,国外学者流行如下的分析:

20世纪40年代第一台电子计算机发明后,随即兴起了一门以计算机工业为基础的信息业。它在发达国家,首先是美国一日千里地发展起来,把国民经济的产业结构,从工业时代的三次产业——"农业—工业—服务业",转变为信息时代的四次产业——"农业—工业—信息业—服务业",因而经济学界都把信息业称为第四产业,其主要代表人物有:

(1)马克卢普。美国经济学家马克卢普在《知识产业》(1962年)一书中,首次分析了知识的生产和分配在美国国民生产总值中所占的比例。他所说的知识产业包括教育、研究与发展、通讯媒介、信息机器、信息服务等,它们被认为是信息业。

(2)波拉特。20世纪70年代微型计算机开发成功,计算机市场从专家扩大到公众,信息业飞速发展,美国经济学家波拉特在《信息经济学》(1977年)一书中,进一步阐明了信息活动在美国经济中所处的地位,他把美国国民经济结构分为六大部门,即:第一信息部门、第二信息部门、民间管理部门、公共制造部门、民间制造部门与家庭经济部门,其中有三个部门是专门从事信息活动的。

(3)奈斯比特。美国社会预测学家奈斯比特在《大趋势》(1982年)一书中,通过广泛的调查研究指出,从1950年以来,在美国经济发展中真正增长的是信息业。到1981年,美国从事信息方面工作的人已经超过60%。另外还有许多人在制造厂商公司里从事信息工作。据此他认为,美国社会发生了从工业社会向信息社会的转变。信息社会是一个以创造和分配信息为基础的经济社会。

钱老站在马克思主义立场上，从现代科技革命的新形势出发，从我国社会主义现代化建设的战略任务考虑，对国内外流行的“第四产业”概念提出了不同的观点，认为第四产业不是信息业，而是科学技术业。

钱老从战略科学家的高度预见到，在科技革命新时代，科学技术业必将成为我国发展中的一项战略产业，它的建立与发展必将加快我国现代化的进程，必将大大增强我国的综合国力，这是因为：

第一，实现邓小平“发展高科技，实现产业化”、“中国必须在世界高科技领域占有一席之地”的战略措施，首先必须明确高科技究竟包括哪些部门？钱老从系统学的整体观与发展观出发，把现代科学技术概括总结成一个体系，即：①在认识的内容上，它包括自然科学、社会科学与思维科学等 11 个部门；②在认识的过程上，它包括基础理论、技术科学与应用技术三个层次。因而高科技应包括 11 个部门；高科技的产业化应包括全部现代科学技术的产业化。显然这决不只是信息业一门产业，而是以整个现代科学技术为基础的一大类产业，这一大类产业就是科学技术业。

第二，科学技术业同信息业相比，范围更广，内涵更深，影响更大。因为现代科学技术发展呈现出如下的特点：一是物质、能量与信息三大科学技术互相联系、互相促进，缺一不可，它们一起构成了现代人类文明的基石。二是自然科学与社会科学融合的潮流势不可挡，列宁早就指出：从自然科学奔向社会科学的强大潮流，在 20 世纪将更加强大。和这股潮流相适应的、以整个现代科学技术知识为基础的、一大类新兴的知识密集型产业必将陆续涌现，如文化产业、生态产业，等等。

第三，在新产业革命的影响下，根据现代化的需要，根据我国人口 80% 在农村的特点，在科学技术业中知识型农业占有特别重要的地位。钱老提出的知识型农业，就是利用现代科学技术知识（包括对地球表层的系统认识）、利用信息革命成果（包括系统管理的最新成果）和利用新材料与新工艺建立起来的现代农业。这是“一个高度知识密集的、技术密集的、高效能的大农业——综合农业体系。”钱老认为，这种知识密集型农业依靠人工能源，不受气象限制，可常年在工厂大规模生产，节土、节水，不污染环境，资源可循环利用，是我国农业改革中切实可行的路子。它必将在 21 世纪我国的大地兴起，并将大大消除工农差别、城乡差别，加速我国农业现代化的进程。

二、组织管理是建立与发展科学技术业的关键

建立与发展科学技术业需要解决一个重大问题：如何把科学技术研成果转化为现实生产力？这个问题的关键是必须进行科学的组织管理。

关于组织管理的重要性，美国著名管理学家彼德·德鲁克指出，现代社会是有组织的社会，所有各种组织为了完成它们担负的任务，都需要解决管理问题，即：如何把人员、资源和工作组织起来以提高生产效率，提高工作效率？如何制订组织发展的战略规划？如

何提高组织的应变能力,以便在不确定的情况下做出决策?等等。日本曾经提出管理是生产的第四要素的理论,其他三个要素是劳动、土地和资本。

钱老是热爱祖国、忠诚于党的事业的科学家,他时刻关心着社会主义现代化建设事业,对如何发展科学技术业这一重大问题,他根据过去我国在极其困难的条件下搞成“两弹一星”的经验,根据他创建的、有中国特色的系统工程,不仅提出了组织管理的重要性,而且提出了如何建立“把科学技术研究成果转化为现实生产力”的组织管理体制的设想。他认为,首先,要充分利用社会主义社会组织性强、纪律性好的优越性,按照“基础理论—技术科学—应用技术”三个互相衔接的过程进行组织工作;其次,要针对我国科技界单项成果不错,但集体力量发挥不够的问题。为此,他建议成立以下三个层次的组织:

第一层次。组建国家的科学技术业公司,属国家所有,享受国家大、中型企业的政策待遇。它的任务是协调全国的科学技术工作,并把全国科研机构的成果组织起来,其成果不仅面向国内,而且面向国际,这是垄断性质的公司。比如,在半导体和大规模集成电路领域,建立一个总公司,它通过合同手段协调全国半导体和大规模集成电路的发展。而合同的招标、签订,按竞争的原则办。科技公司的成果是出新技术、技术专利。

第二层次。建立各种科技专业开发公司,专门负责把科技成果向现实生产力转化的工作。因为仅有各个领域的科技公司推出的新技术与技术专利还不够,要使其中每一个单项技术应用到生产中去,还需要有一个落实转化工作的中间环节,它根据工厂的需要,吸取可用的成果,将一项项单个成果综合设计成生产体系,并负责培训工厂的技术人员和工人。

第三层次。建立各种综合系统设计中心,或者由各部门现有的设计单位承担这一任务。

钱老指出:“科学技术业并不是要取代现有的机构,如中国科学院、中国社会科学院、高等院校的科研机构等,而是要把他们的成果组织起来,而且用组织起来的手段协调全国的科学技术工作。”

总之,“今天当我们面向20世纪,面对国际间的激烈竞争,为了中国的社会主义事业,必须把科学技术作为第一生产力。具体的办法就是建立科学技术业。”按照实际情况,我国的科学技术业包括以下三个组成部分:

(1)我国现有的科技力量,包括各种科研院、研究所等;

(2)各种科技专业公司;

(3)各种综合系统设计中心。

三、培养领导科学技术业的科技帅才

当前这场新产业革命给工业时代科技人才的培养方式带来了新的需求,因为这场新产业革命处在交叉科学蓬勃发展的新时代,它要求培养一类特殊的科技人才——科技帅

才,他们是科学技术业的指挥家与组织家,在实施“科教兴国”、“可持续发展”与“西部大开发”三大战略中发挥特殊的作用。特别是在当代,“科学—技术—生产—社会”一体化的进程日益加快,科技帅才的培养已经成为发展科学技术业、发展生产力亟待解决的重要任务。

在近代史上,科技人才的培养与科学技术的发展有密切的关系。在西方,18世纪末法国建立了规模最大的多科技术学院,开近代科学技术教育的先河;美国于1824年开办了最早的一所工科大学——伦塞勒工艺学院;1870年威斯康星大学第一个设立了工学院,下设土木、机械、矿山采矿、金属等学科。这都是在工业时代适应资产阶级发展工业生产的需要建立起来的。

钱老根据他在美国学习理工科的经历,结合现代科学技术发展的情况,指出美国培养科技人才的教育思想与教育体制的演变过程如下:

(1)从19世纪70年代起,麻州理工学院培养工程师,实行四年制。前两年学基础科学理论,包括物理、化学等;后两年学专业技术,毕业时做毕业设计。这样的工程师具有基础理论知识,能适应科学技术新的发展并能创造性地工作。这套教育体制流行于全世界。

(2)20世纪30年代,由于科学技术发展迅速,用麻州理工学院培养出来的人很难适应。德国哥廷根大学早在20世纪初就进行了改革,它开创了应用力学专业,将基础理论与工程应用联系起来,加强基础理论的学习。加州理工学院发展完善了它原来的教育体制;加强基础理论教育,减少工程课程,而且将学制延长到七年,这样培养出来的学生,基础知识扎实,各种新的发展都能跟上。第二次世界大战以后,这一教育思想已被人们普遍接受。

进入20世纪90年代,科学技术发展的情况有了非常大的变化。现代科学技术正朝着高度分化又高度综合的方向发展,形成了一个庞大的体系。在这个新的情况下,钱老认为必须从整体的与发展的观点来发展科学技术业,培养一类特殊的科技人才——科技帅才,他们是科学技术业的指挥家、组织家,不仅对这门事业的发展有系统的观点,而且要有控制能力。显然麻州与加州理工学院培养单科人才的教育制度与教育方法不能适应这一新的要求。因此,他向中央领导建议,为了迎接交叉科学时代的挑战,发展科学技术业,必须把培养科技帅才作为实现“科学技术是第一生产力”思想的重大战略任务来抓。这是新时代赋予我们的历史使命。钱老认为:“所谓科技帅才,就不只是一个方面的专家,他要全面指挥,就必须有广博的知识,而且要能敏锐地看到未来的发展。”他们是从工业化走向信息化、走向智能化不可或缺的人才。培养科技帅才,发展科学技术业,走跨越式的发展道路,这是新时代赋予我们的新课题。

关于如何培养科技帅才,使他们对科学技术业有远见、有创造性和全面的指挥能力,钱老认为,必须努力学习以下几个方面的内容:

1.要学习马克思主义哲学

因为马克思主义哲学是人类智慧的结晶,是科学的世界观与方法论,是分析问题与解

决问题的思想武器。

2. 要了解整个科学技术的发展动向

因为现代科学技术已经形成一个相当完整的、不断发展的、开放的体系:从认识过程看是三个层次,从目前的情况看可以概括为十一大门类。对现代科学技术必须有整体的观点和发展的观点,才能发现新动向,提出新问题,组织人去研究。

3. 要学习世界发展的新知识

当代世界各种矛盾与冲突层出不穷,局部战争、政治事件与经济动荡接二连三出现,如海湾战争,金融危机、科索沃战争等等,要了解它们的起因、历史、发展趋向、事态后果,等等,以便及时作出对策,迎接世界的挑战。

4. 要学习军事科学知识,包括组织管理方面的知识和才能

在国际竞争日益激烈的时代,霸权主义国家除了采用经济手段压榨与制裁外,最终总是要动用军事力量来迫使它国就范。要打仗就要学习军事科学知识。

5. 学点文学艺术

它可以培养人从另一角度看问题,避免钻牛角尖,避免机械唯物论。科学的逻辑思维与文学艺术的形象思维的结合,是创造力、智力的关键所在。古往今来许多有名的科学家、思想家和革新家都有很高的文艺修养。

当然,科技帅才还要有健康的身体,健康的身体是一切活动的物质基础,不容有丝毫的忽视。

参 考 文 献

1 迎接新的技术革命——新技术革命知识讲座 . 长沙:湖南科学技术出版社,1984

2 九十年代科技发展与中国现代化 . 长沙:湖南科学技术出版社,1991

作者简介:黄顺基 1925年出生,广西昭平县人。硕士。中国人民大学哲学系教授,中国自然辩证法研究会常务理事,北京创新学会顾问。主要从事逻辑学、科学技术哲学、科学技术社会学的教学与研究工作。主要著作有:《大杠杆——震撼社会的新技术革命》(获国家教委全国高等学校首届人文社会科学研究优秀成果奖二等奖)、《科学技术哲学引论》(获第六届中国图书奖二等奖)、《科技革命影响论》、《大动力——科学技术动力论》、《大创新——企业活力论》、《现代信息技术知识基础》等。

钱学森与控制论

郑应平

一、控制论的内容、发展及其重要作用

人类在社会实践中很早就希望构造一些精巧的机器能够代替人类自动完成一些复杂的操作。最早实现的这类功能包括自动计时，自动定向，利用水力、风力的自动装置，等等。科学技术发展的推动力归根结底来自于社会生产的需求。瓦特蒸汽机首先解决了动力问题，但为了能够正常工作，瓦特还发明了一种离心调速器，它能自动调节进汽阀门以保持一定的转速。这里他实际上已采用了反馈原理，即根据转速变化引起离心球高度变化反过来调整蒸汽输入以调整转速。这里有个“度”的问题，即不能矫枉过正，否则会恶性循环，自激振荡。为此物理学家麦克斯韦研究了这种反馈系统的稳定性问题，并于1868年发表论文《论调节器》，当属最早的理论工作。

当时控制的对象主要是机械和电子系统。20世纪20年代以来，在电路和无线电方面运用频谱分析方法得到了关于系统稳定性和其他品质分析的大量成果。这套理论恰好可用于控制系统分析，形成今天所谓的古典调节理论，它们至今仍广泛用于许多简单的实际问题。较复杂的问题则涉及非线性和随机输入下的系统品质和控制问题。前者导入了李雅普诺夫和庞加莱关于动态系统稳定性和动态行为定性分析方法；后者则由维纳发展了统计滤波和预测理论，据说曾用于“第二次世界大战”中的防空火炮控制。三四十年代，系统和控制思想空前活跃，有贝塔琅菲的一般系统论，维纳的控制论，申农除了信息论以外，还发表了关于继电开关逻辑综合的理论，至今仍是计算机等离散状态系统控制综合的理论基础。冯·诺依曼除了决策和博弈理论以外，还提出了现代计算机体系结构和自组织、自修复、自繁殖系统的初步想法；阿什贝的控制论则比较强调从生物医学的角度提出新的思想，例如体温的自行镇定(homeostat)和适应环境(ultrastable)的系统。所谓“老三论”就是那时开始形成的，它们今天仍然是信息科学技术发展的部分理论基础。

二、控制论发展面临的问题

维纳把控制论界定为“在动物和机器中控制和通讯的科学”。他选用的术语“Cybernetics”既来自希腊文中“掌舵人”的概念，又与麦克斯韦1868年的论文中“调速器”一词有关。但其内容主要涉及统计力学在通信、滤波和控制中的应用，反馈原理和稳定机制，控制论

原理在生物医学和社会管理中的应用,等等。这也不难从其各章标题看出:牛顿时间和柏格森时间,群和统计力学,时间序列、信息和通讯,反馈和振荡,计算机和神经系统,完形和普遍概念,控制论和精神病理学,信息、语言和社会,等等。此外,在第二版还加入了自繁殖机一章。阿什贝的书也类似。他们较多地谈论思想和方法论,而如何将它们用于解决工程实际问题已成为人们关注的焦点。

钱学森的《工程控制论》(英文版)在1954年应运而生。它包括18章,其篇幅按1958年的中译本计为33万字,其内容特点可概括如下。

(1)面向工程应用的理论书中指出,控制论(Cybernetics)一词,安培曾于1845年用于描述一种关于国务管理的科学;工程中广泛应用的古典(伺服)控制系统理论(1930~1940年)是关于机械系统与电器系统的控制与操纵的科学;维纳控制论(1948年)则是一种较为普遍的关于动物体和机器的控制与通讯的科学;钱学森进而将控制论的主要问题概括为"一个系统的不同部分之间相互作用的定性性质,以及由此决定的整个系统总体的运动状态"的研究;而工程控制论则被界定为研究控制论这门科学中能够直接用在控制系统工程设计的那些部分。它除了应当包括伺服系统工程实际的内容之外,更深刻、更重要的在于作为技术科学,应把工程实际中各种原理方法整理总结成为理论,以显示其在不同领域应用中的共性,以及许多基本概念的重要作用,它的重点在于理论分析,而不是系统部件的详细构造和设计问题。作为技术科学,工程控制论使我们可能以更广阔的眼界、更系统的方法来观察有关的问题,从而得到解决老问题更有效的新方法,并揭示新的前景。

(2)承前启后。从理论结合工程实际的角度极其精炼地介绍了从应用拉普拉

斯变换和传递函数概念解决线性常系数反馈伺服系统问题到非线性、变系数、时滞、多变量解耦(自治)、交流伺服、采样(离散时间)系统、自寻最佳点、噪声过滤和最速开关控制,以及自行镇定超稳定性和可靠性设计等当时最新甚至超前的研究成果。处于"古典(传递函数,频域法)"和"现代(状态空间)"控制理论的转折,起到承前启后的作用。随着工业、国防等方面不断提出新的技术需求,以及电子计算机的日益广泛应用和数学理论方法的发展,钱学森于1961年建议由关肇直、宋健等组织了现代控制理论讨论班,引导一批青年学者投身这一领域,使我国控制理论研究能较快赶上世界潮流。1980年与宋健等人共同完成的《工程控制论》中文修订版,更完整地反映了近期的进展,特别是中国学者的工作。

(3)综合集成。钱学森在对维纳的控制论、申农的信息论、贝塔琅菲的一般系统论、冯·诺意曼的博弈论以及信息论、系统论等基本肯定的同时,也指出其简单化的倾向。书中就其精华所做的精辟概括及突出强调贯穿全书的技术科学方法论,具有重要的指导意义。特别是他明确给出控制论在系统科学体系结构中的定位以及复杂巨系统及其从定性到定量的综合集成方法论,为这类重要系统的建模、分析、运筹和控制问题提供了理论和方法论的依据。

三、从现代控制理论、大系统理论到复杂系统及其控制理论

由于维纳控制论比较抽象的内容和比较广阔的思想，它与控制工程有一定的距离。在1978年纪念《控制论》发表30周年之际，国外曾征文以最短的篇幅阐明控制论的实质内容。对此，我们也曾进行思考并提出若干自己的看法。

实际上，控制论的基本问题，即如何对系统施加控制作用使其表现出预定的行为，并不等于按其数学模型由预定轨道解一个“反问题”以求出控制输入这样一个数学的问题。关键在于存在各种不确定因素（uncertainty），任意小的误差或噪声干扰若处理不当就可能导致严重的后果。因此，反馈系统要比开环系统强；稳定性的频率判据要比代数判据更接近实用；系统的结构和参数存在误差或发生变化时，为使系统保持良好性能，就需要研究系统对这些变化的灵敏度或鲁棒性问题；当存在噪声等随机不确定性时可以用统计滤波等方法；而当系统特性变化缓慢时可以采取自适应、自校正等方法跟踪这些变化；若存在主观的不确定性或知识不足时，又可以利用模糊控制、智能控制等技术；如此等等。可以概括地说，控制理论的所有概念、方法和内容都可归结为针对某种不确定性而使系统保持预定的品质。包括大系统、复杂系统和复杂巨系统的控制，要解决的也是由于“大”和“复杂”而无法用还原论方法进行微观处理所带来的不确定性问题。用这条线索可以把整个控制论串起来。对于非控制专业人员，由此也不难理解控制论的基本思想、理论和方法论。

工程控制论在各方面得到了广泛的应用。20世纪四五十年代用于船舶、火炮等机电系统操纵的伺服（随动）系统理论和技术已发展得比较充分，并在工业、国防中发挥重要作用。60年代前后，由于火箭和航天技术的需求和支持，加上计算机技术的进步，发展了基于状态空间描述的多变量控制系统分析和设计理论，以极大值原理和动态规划为代表的最优控制和最优化理论、卡尔曼滤波和随机最优控制理论、非线性系统分析的状态空间方法，以及用于工业和国防的自适应和自校正控制系统理论，等等。以上述内容为主的现代控制理论曾经得到充分的支持和蓬勃的发展，并在1968年美国阿波罗成功登月中起到了很好的作用。这里的许多理论和技术在《工程控制论》中均已做了总结和概括。有趣的是，由于大功告成，美国航天局撤消了对这方面的大量支持，解聘了许多雇员，迫使他们转向工业、生物医学、社会经济等新的应用领域，以寻求新的发展和支持。

使人感到意外的是：他们引为自豪的那些“交会对接”、“软着陆”等高精尖技术并没有很快找到用武之地或起到立竿见影的效果。那些新领域的对象和问题比较含糊、多变，难以描述，或者规模大、变量多，无法一揽子处理。许多问题事实上也不必要动用那些昂贵、精密的仪器和设备。与此相应地倒是发展了大系统、模糊性理论、智能技术等新的方向，开辟了新的思路。在1980～1981年《工程控制论》修订版中增加了5章新的内容：最速控制系统，分布参数控制系统，逻辑控制和有限自动机、信号与信息，以及大系统理论，也部

分地反映了这种情况。

国外在这一时期也出版了几种以“工程控制论”为题的著作,如乌克兰的伊瓦赫年柯(1962年)等,主要介绍了有关自适应、自校正、自学习、变结构、极值控制等方面的一些新结果;美国 R.M.Glorioso 的《Engineering Cybernetics》(1975,1983年)则侧重于智能系统方面的概念,与工程应用都有较大的距离。实际问题要考虑更多的约束因素,这比理论更加复杂。但同时也由于问题的特殊性而使人得到启发,找出解题的办法。只有通过结合实际的研究,才能不断地有所发现、有所前进。这也是钱学森教授经常对年轻人的谆谆教导。

四、系统工程和系统科学

1978年,钱学森、许国志、王寿云在文汇报上发表文章,推动了系统工程在中国的发展和应用。作为系统科学工程应用层次与自动控制并列的学科分支,系统工程在我国的发展和取得的成就是有目共睹的。对于控制论来说,一方面,系统工程从管理的角度为控制问题明确指标、分配资源、规定约束,以求得达到全局的目标和均衡;另一方面,系统工程涉及到的人、物、事的全面协调,人类决策和对人的管理,各类“事件”的安排、调度等原属运筹学的内容也进入了控制领域。同样,系统动态演化过程,信息反馈和调度控制的概念,特别是离散事件和混杂系统控制等前沿分支,也自然地进入了系统工程。同时在系统工程领域,根据问题的不同,采用不同的模型和技术方法进行综合集成,已被公认为基本的方法论。

尽管系统工程领域早已开展了方法论的研究,Hall, Wymore, Sage 等人也都发表了专门的论著,但他们多限于简单地把它看成为一个过程、一种使用方法的方法,等等。韦氏大辞典中辞条“methodology”释义为“用于科学,艺术或条律的方法,程式,法则,假定及工作概念的总体”,“用于解一个问题或做一件事的一组过程,技术,途径,一个特定的程式或一组程式”,似乎说得还更清楚些。相比之下,钱学森等人1978年关于系统工程方法论的提法更加全面,更适用于我们的问题,更具可操作性。

作为对照,若干年后著名的国际应用系统分析研究所(IIASA)曾在1980年组织过一次对于系统工程的反思的讨论会。他们也谈到了需要一个坚实的方法论的基础,传统的还原论方法已不适用,并特别强调要从实际需求出发并运用经验知识,等等。其文集出版于1984年,这也说明了我国在这方面工作的正确性和先进性。

1985年,钱学森在“大系统理论要创新”的讲话中指出,大系统理论属于技术科学,要注意利用知识和经验,并接受基础层次的系统学的指导。此外,还建议结合国家宏观社会经济问题组织交叉学科合作研究。

1986年在系统学讨论会上,钱学森多次明确提出了系统科学的体系:与哲学联系的系统论、基础层次的系统学、应用基础或技术科学层次的控制论和运筹学等分支,以及控制工程和系统工程等直接用于解决实际问题的工程技术层次的内容。其后,又将其总结为

“开放的复杂巨系统综合集成方法论”及其在各方面实际应用的学科体系。以上表明,30多年来,钱学森先生从工程控制论到系统科学体系的形成,再次明确了控制论在其中的地位,实现了一次重大的飞跃。

五、控制理论面临的挑战及其未来的发展方向

系统和控制科学的这一飞跃归根结底来自对复杂性和复杂系统的认识。将这种认识用于改造世界,人们在实践中遇到了更多的复杂性问题的挑战,并逐渐深化了对于复杂系统、复杂巨系统的控制问题的认识。应当说这是当前科技发展的趋势,也是国际控制界近年的热门话题。钱学森早在1986年就指出了控制论和自动化在社会生产、科技进步和人类文明建设等各方面的重要作用,并把控制论纳入复杂系统和复杂巨系统研究框架的思路。有趣的是,国内外控制界紧随其后也掀起了一股研讨自动控制面临复杂性问题的重大挑战,亟需寻求新的思想、方法和工具的研讨热潮。从中亦可看出钱学森对控制论发展趋势的预见性,具有重要的理论和实际意义。

1986年9月,美国IEEE和国家科学基金会邀请52名各国专家举行了一次关于“对控制的挑战”的研讨会。在回顾自动控制在航天航空、通讯网络、制造系统等科技领域中的重要作用之后,他们指出了目前控制科学面临的一系列挑战问题,诸如:未能完善建模或需要在运行中不断改进模型的系统;由突发事件驱动引起离散状态转移的各种模型描述的系统,它们需要与传统动态系统有本质不同的处理办法,也更接近计算机和逻辑控制的实际过程;鲁棒、自适应和容错控制;随机、非线性和分布参数控制问题;信号处理和通讯中的控制问题;分布式信号处理和决策机制问题;系统集成、实验及其技术实现;以及人和机器在更高层次上和谐交互的问题,等等。

1988年,美国工业和应用数学协会(SIAM)组织专家研讨提出了“控制理论的未来方向”的调研报告。报告指出控制理论需要内容丰富的数学工具,并综合应用于建模、分析、计算和实验各方面。当前的挑战问题可概括为:非线性、多变量和分布参数的许多基本理论问题;机器人、加工系统和空间技术提出了许多新的挑战问题;日显重要的实验研究不仅用于建立面向控制的模型,也用于检验新控制范式的有效性;计算能力的迅速进步不仅可提供实时算法,也为开发新控制范式提供巨大的需求和机会。必须克服重视有形的硬件而忽略其中算法和理论的倾向,才能保持领先地位。

国际自控联(IFAC)理论委员会曾于1990~1993年组织关于“控制在工业中应用面临计算机的挑战”的调研,发表了总报告和14个工业项目调研分报告。这些项目包括钢铁工业、城市供水网络、汽车控制、生产调度、集成电路生产、垂直起落飞机、水力发电和城市供电管理、监控系统和故障诊断以及柔性空间结构控制,等等。其目的在于弄清其中控制论所起的作用,特别是由于计算机扮演着越来越重要的角色,形成了对控制的挑战。在统计的工业项目中,计算机的投入占60%以上,其中大部为软件的费用。软件中应用软件

又远大于系统软件,反映理论成果的“智能软件”只占软件投入的5%~10%。尽管应用领域不同,其共性问题是系统和软件的复杂性。典型的程序规模达百万条语句,瓶颈问题为大型软件的规范描述,编程实现和验证查错。离散事件和混杂动态系统的理论和计算机科学的最新成果将有助于解决这一问题。

《欧洲控制杂志》1995年曾就控制理论当前面临的挑战问题对专家进行问卷调查。普遍认为,必须有新的应用、新的血液和新的研究问题,否则就要灭亡。其具体内容包括鲁棒控制、非线性系统、混杂系统、控制器和对象的集成设计以及系统/控制/逻辑/计算机的融合,等等。特别值得强调的是计算机在其中的作用,它不仅是实现手段,而且近来发展的并行处理、矢量算法、自动编程、人机界面和CAD技术等,将为复杂系统控制设计提供越来越方便的手段。

1996年,在美国召开的“网络和系统的数学理论”国际会议的大会报告汇编《21世纪的系统与控制科学》中,强调运用新的方法论来解决诸如飞机设计、电路模拟、图像语音合成以及计算机视觉等各领域的问题。涉及的具体问题包括正系统理论(经济系统、马氏决策)、大变形弹性理论(合成橡胶动力学)、控制系统设计的数值方法研究、流形上的随机过程(用于计算机视觉)、非线性系统控制的新途径、集值映射、运动目标检测和视觉运动控制、风险敏感的马氏决策、自动目标重构算法,以及战斗机和导弹控制技术及其向工业的转移,等等。

宋健教授于1999年在北京召开的国际自控联第14届世界大会所做的题为《21世纪的控制》的大会报告中指出:推动自动控制学科发展的主要动力仍然是物质生产和消费。系统的智能程度将提高,对智能和复杂性的定量刻划将是未来发展的紧迫任务。控制的应用范围今天已扩展到制造工业、农业、航天航空和服务业,今后还将发展到金融业、生活及企业经营的计算机和智能化、机器人和外太空探索等。前沿科学领域,如分子生物学、人类基因破译,也都要用到系统和控制科学的概念和方法。具体前沿课题包括:非线性(微分流形/辛流形方法)、离散事件系统、分布参数系统、鲁棒控制、自适应/自校正/自组织和容错控制,等等。

以上国内外学者共同关注的问题和许多具体深入的观点再次体现了钱学森在《工程控制论》中提出的技术科学方法论,特别是近年关于系统科学学科体系和复杂巨系统综合集成的理论,对当代科技发展仍然具有重要的指导作用。

六、控制问题的特殊复杂性

对于复杂系统控制问题的特殊复杂性,即所谓复杂控制问题,我们也给予了充分的重视。这是因为除了控制对象的复杂性外,技术工具的进步如半导体微电子学、光学和光电子学,计算机和通信网络等信息采集、存储、传输、计算和处理技术的迅速发展,也强力推动着自动控制等具有明确的“改造世界”特征的那些学科分支的发展。这些技术工具反过

来又给系统带来了新的复杂因素,提出了新的复杂性研究问题。人们认识到,在控制问题中除了被控系统本身的复杂性外,还要考虑许多新的复杂因素。这种复杂控制问题可以看成是几方面复杂性的综合:

(1)被控系统的复杂性。大规模、非线性、多层次、多子系统、不确定性、人机交互及高复杂度的离散变量,须用不同模型描述,等等。

(2)系统环境的复杂性。噪声、干扰、环境变化或未知(海底,外太空)及部件失灵,等等。

(3)控制器的复杂性。传感、执行、计算机本身、互联网上的控制、对系统本身特性的影响(例如传感器、执行器的安放问题)及人机交互问题。

(4)控制问题本身的复杂性。系统设计的目标(过高或过低)、性能和费用的折衷、多目标优化及多人合作或冲突环境中行为的不确定性。

由于这些复杂因素的错综复杂的影响,复杂控制问题具有极大的挑战性,因此,智能化的方法是不可避免的。

关于智能,这里仅限于智能技术的应用方面。概括地说,智能技术总是由于问题过于复杂,无法或不值得花大力气精确处理,因而可采用一些近似的、经验的办法,以给出某种满意的解答。它是经验规则的总结和应用。由于可用计算机帮助处理大量数据,可以在一定范围内做得更快更好,事实上这就是最常见的一种智能化的途径。智能技术的大量研究在于对人类决策行为的分析和模仿,它可以是规范式(normative)的,或者是描述式的(descriptive)。当具有多决策单元相互作用协同工作的情形,将遇到多人决策和博弈论的问题。各单元拥有的信息多寡将强烈影响全局的结果,这也是信息经济学的基本问题之一。

七、21世纪信息科技与控制论

当今人类已进入信息时代,系统与控制科学技术无论在改造人类主客观世界,还是在信息社会的国际竞争中,都具有关键的作用。它关系到国家乃至全人类的命运。正当地球上物质和能量资源日趋衰竭之时,信息资源及其处理能力仍以每一二年翻一番的势头迅速增长(摩尔定率),这种趋势对系统与控制科学提出了挑战。

系统与控制科学旨在运用信息技术的最新成果,延伸人的信息获取、处理和决策控制的能力,解决人类社会面临的紧迫问题,达到改造世界的目的。人类当前面临的重大问题涉及自然探索、高新科技发展、物质财富生产、国防尖端和基础设施建设、社会管理和经济贸易、全球问题乃至人类自身行为和智能活动等方面。其中无论人的因素、客观对象,还是以计算机和通信网络为代表的各种技术工具,都是十分复杂的,它们之间相互作用形成的复杂系统控制问题正是当前控制科学的主要课题。

与其他学科分支相比,系统与控制学科的发展更多地受到实际问题的推动和启发,也

受到半导体、光电子技术、通信、计算机等相关学科的强烈影响,诸如关于知识和智能的研究、控制系统仿真和 CAD、基于通信网络或 Internet 的分布式控制系统,等等。它们将为复杂系统和复杂巨系统及其控制问题的研究不断提供强大的需求推动和技术支持。这对于新时代系统与控制科学的发展既是挑战,也提供了无限生机。

八、结束语

控制论通过对系统运动规律的认识,能动地运用有关的信息并施加控制作用以影响系统运行行为,使之达到人类预定的目标。控制论是系统研究中最接近实际应用的学科分支,特别具有改造世界的品格。钱学森的工程控制论首先解决了一批工程实际中的控制论问题,并在不断探索各种复杂性层次系统运动规律的基础上,密切结合我国国防和政治、经济建设的需要,提出和解决了大系统、复杂系统和复杂巨系统的组织管理和控制中的大量理论和实践问题。由于他渊博的知识、科学的世界观和丰富的实践经验,从文中介绍的发展现状可以看到他在控制论方面的贡献明显高于国内外同行。

继承钱学森在控制论中开创的技术科学的学术传统,结合我国国情研究系统科学多层次的集成体系,形成从基础科学到工程应用的、实证的系统与控制科学技术体系,可能还需要几代人的献身努力。这一过程必将对我国和全人类做出重大的贡献。

参考文献

1 Tsien H S. Engineering cybernetics. New York: McGraw-Hill, 1954

2 钱学森. 工程控制论. 戴汝为, 何善锵译. 北京:科学出版社, 1958

3 钱学森, 宋健. 工程控制论(修订版). 北京:科学出版社, 1980~1981

4 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 文汇报,1978-09-27

5 钱学森. 大系统理论要创新. 系统工程理论与实践, 1986(1):1

6 宋 健. 21 世纪的控制. 国际自控联(IFAC)第 14 届世界大会论文集. 北京:1999

7 黄 琳,秦化淑,郑应平,等. 复杂控制系统理论:构想与前景. 自动化学报,1993(2):129~137

8 郑应平. 复杂系统及其控制理论. 21 世纪初科学发展趋势. 北京:科学出版社,1996.342~344

作者简介:郑应平 1941 年出生,福建福州市人,同济大学 CIMS 研究中心教授,博士生导师。

钱学森先生和现代控制理论

陈翰馥 秦化淑

钱学森先生作为当代杰出的科学家,他对流体力学、工程控制论、系统工程及系统科学的巨大贡献以及他对我国发展“两弹一星”所起的无可比拟的作用,是人们较为熟悉的,但他对发展我国现代控制理论的重要作用,却较少被人提到。

对“控制论”的发展,有一些常识的人都知道,“控制论”最早是由美国数学家维纳提出的,其中能在工程实际中发挥作用的控制理论,经历了从经典控制论到现代控制理论的发展。经典控制论把受控对象(系统)用常系数的常微分方程来描述,把系统输出量的比例放大(P),或它的积分(I)甚至微分(D)组成反馈控制量,作为系统输入,使系统输出和理想值之间的误差渐渐地趋于零,这样的控制器也叫做PID调节器,相应的理论在20世纪二三十年代发展起来,在前苏联称为自动调节原理。钱先生于1954年在美国出版的《工程控制论》是控制论的名著,被译成多种文字,它的中译本由戴汝为、何善育译出。经典控制论在工程系统控制中发挥了巨大作用,它以其“简单”、“可靠”、“适用性强”的特点,深受广大工程技术人员欢迎。

随着航天、航空、航海技术的发展,对控制提出了快速、精确、可靠的要求,而这些新的控制系统很难用单变量常系数微分方程来描述,经典控制论就显得不能满足要求。实际需要期待着出现新的控制理论。20世纪50年代末到60年代初,在苏联出现了庞特里雅金的极大值原理,在美国出现了贝尔曼的动态规划和卡尔曼滤波以及他以状态空间描述的控制论。这三项工作,后来被公认为是现代控制理论的奠基性工作。从20世纪五六十年代至今,现代控制理论经历了四十多年生机勃勃的发展,在制导、导航及各种工业过程中,得到了前所未有的成功应用。

这样一个重要的发展趋势,现在回头来看,是再清楚不过了。但在当时,国际上经典控制的知名大家有几位看清了现代控制理论这个发展苗头?记得1960年在莫斯科举行第一届IFAC(国际自动控制联合会)世界大会时,卡尔曼展示了他现在已被公认的奠基性工作,但当时卡尔曼还是一位年轻的学者,他的工作被苏联经典控制论的权威质问得好像一无是处。但钱学森并不仅是经典控制论的权威,他的学识更广博,心胸更宽广,在1961年他就高瞻远瞩地看到了现代控制理论正在形成和发展的趋势,看到了它的发展对制导和导航的重要作用,他提出要有一支中国自己的控制理论与工程结合的队伍,必须建立一个研究室,发展控制理论。

在绝大多数经典控制专家们还未意识到现代控制理论已在悄悄发展的时候,钱先生

不仅敏锐地看到了这个动向,并且有了正确的理解,认识到这个新的发展方向是自动控制和数学的交叉,所以他找到了中国科学院数学研究所副所长、著名数学家关肇直先生,提出由中国人民解放军第五研究院与中国科学院共建一个控制理论研究室,设在中国科学院数学研究所,这是一个多么令人叹服的具远见卓识的建议!

钱先生的建议得到了关肇直先生的热烈响应,并得到了中国科学院的支持。由中国科学院裴丽生副院长负责中国科学院方面的组建工作,酝酿成立了新的研究室,命名为"控制理论研究室",由五院及中国科学院共建,研究室放在中国科学院数学所,由数学所副所长关肇直兼任室主任,在五院方面由第二分院二支队宋健同志兼任室的副主任。

笔者是该室的首批成员,多次听到关先生讲到钱先生对创建控制理论室、推动我国发展现代控制论的重大作用,但关先生已于1982年过世,不能再提供更直接的材料。但我们清楚地记得,参加1962年3月在中国科学院数学所(现中科院计算所大楼)415室举行控制理论研究室成立大会的情况。当时由中国科学院秦力生副院长宣布中国科学院"关于在数学研究所成立控制理论研究室的决定",说明了成立研究室的背景和过程,强调了钱先生的决定性作用,宣布了室主任及副主任名单。研究室的成员在中国科学院方面除了关先生外,还有7位年轻成员,在五院方面除了宋健同志外,还有何国伟及4位年轻同志,其中除宋健和何国伟两位每周来一天指导工作外,其余人常驻在数学所。另外,计算所也有几位兼职人员。

研究室成立后不久,于1962年10月,由关肇直、宋健共同发起召开了全国第一次现代控制理论研讨会。钱学森出席了会议,在讲话中,他要大家密切注意国际上控制理论的发展,同时要研究我们导弹研制中提出的控制理论问题,强调研究理论者要了解实际问题,并形象地指出:"只站在水边不够,要敢于'下水',善于'下水'"。

经过近四十年的发展,当时很少有人知晓的现代控制理论,在钱先生高瞻远瞩的倡导和推动下,在国内已成为生机勃勃、并面向多学科渗透的主导学科。由关肇直和宋健亲手创建的控制理论研究室现已发展成为中国科学院系统控制重点实验室,属于数学与系统科学研究院的系统科学研究所。这个实验室继承了过去的优良传统,拓宽了原定的研究目标,取得了一系列受到国际瞩目的研究成果,并培养出许多优秀人才,有的已是活跃在国际自动控制界的知名人物。"问渠哪得清如许,为有源头活水来",看到这许多成果,总使人想起钱学森的精辟见解和关肇直先生的不懈努力。谨以此文祝贺钱先生九十华诞!

作者简介:陈翰馥 1961年毕业于苏联列宁格勒大学。中国科学院院士,IEEE Fellow。曾任中国科学院系统科学所所长,系统控制开放实验室主任。研究领域包括随机系统的辨识、适应控制、参数及状态估计、随机逼近及优化等。发表期刊论文140余篇,专著6本,其中两本在美国出版。现任中国自动化学会理事长,国际自动控制联合会(IFAC)技术局成员,《系统科学与数学》及《控制理论与应用》两刊物主编,4种国际刊物的编委及顾问,《中国科学》等数种国内刊物的编委。

秦化淑　女，1956年毕业于天津南开大学，1961年获波兰雅盖龙大学博士。同年到中国科学院数学研究所。自1962年起任控制理论室学术秘书，后任室副主任、室主任。研究最优控制、非线性系统控制，先后参加反卫星系统、卫星系统、导弹系统的制导与控制及其他有关控制问题研究。从1980年起至今任中国自动化学会常务理事，现任中国自动化学会控制理论专业委员会主任。

综合集成研讨厅的实例及其实现[1]

李耀东 高红霞 吕志坚 戴汝为

一、引 言

对复杂系统的研究是社会实践的需要。理论的发展与技术的进步,也使科学家不再满足于以还原论的方法研究孤立的现象和简单的系统,复杂现象、复杂系统乃至开放的复杂巨系统成为前沿研究的焦点。为处理开放的复杂巨系统问题(地理系统、生态环境、社会经济系统、人脑系统,Internet 等),我国学者钱学森院士等人于 1990 年提炼出"从定性到定量的综合集成法(metasynthesis)"(以下简称"综合集成法"),后来(1992 年)进一步提出了"人机结合从定性到定量的综合集成研讨厅体系"(有时也被称为"人机结合综合集成研讨厅体系"或"从定性到定量的综合集成研讨厅体系",以下简称"研讨厅体系"或"研讨体系")。综合集成研讨厅体系是研究开放复杂巨系统的方法论,是解决复杂问题的有效途径。

20 世纪 90 年代后期,在国家自然科学基金委员会管理学部和信息学部的联合资助下,戴汝为院士等多位学者以宏观经济系统为研究对象,力图把开放的复杂巨系统的有关理论,尤其是研讨厅体系这一方法论应用到宏观经济决策问题领域中。目前这一工作已取得可喜的进展,在有关单位和专家的协助与共同研究下,已经设计并初步实现了一个基于 Internet 平台与技术架构的综合集成研讨厅的雏形。该雏形系统的建成将为学者和研究人员继续深入研究开放的复杂巨系统和复杂问题的求解提供一种范本和可能的途径。

本文首先简要介绍了支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅雏形系统实现中的几个关键问题,然后给出了系统的实现情况。接着本文介绍了使用该雏形系统进行研讨的研讨过程,最后描述了该雏形系统的特点并给出了结论。

二、支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅雏形系统概述

经济系统是典型的、开放的复杂巨系统,宏观经济决策问题是最复杂的问题之一。在把开放的、复杂巨系统的方法论应用于经济系统和宏观经济决策问题,从而建立"支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅"的过程中,存在着一些关键性问题。下面简要介

[1] 基金项目:国家自然科学基金重大项目资助(79990580)。

绍一下这些关键问题及其在该研讨厅雏形中的实现方式。

(一)研讨厅雏形系统功能的划分

基于研讨环境和求解问题对象的各种要求,该研讨厅雏形以 Internet 为基本平台,从逻辑和功能上把雏形系统划分为三个中心:研讨中心、数据中心和管理中心。(图 1)

其中研讨中心以电子会议和 BBS 的形式为用户提供一种"沉浸式"的研讨环境,与研讨有关的控制、功能和服务都集成在这个中心。

数据中心则是一个集成平台,它所包含的内容不仅仅是数据,同时还以各种形式和技术手段为研讨者提供信息、资源等研讨支持,研讨中使用的方法、模型体系同样集成于该中心。

管理中心则用于对前述两个中心的管理,它为系统管理员和相关人员提供了对各种可用资源进行管理的统一界面。

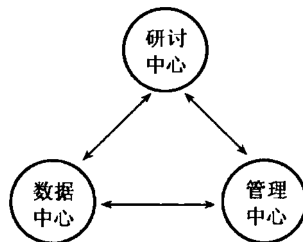


图 1 系统的功能划分

这三个中心均以 Internet 技术实现,三者互相支持,共同协作,形成一个有机的整体,同时基于 Internet 平台和技术的研讨厅雏形使得研讨可以远程进行,对研讨者来说消除了地理位置的差异。

(二)人机结合与综合集成

人机结合和综合集成的思想是该研讨厅雏形的核心指导思想,在技术实现中主要体现在以下几个方面:研讨流程的控制与调度、专家思维收敛过程、人机交互方式、综合多种资源、信息、知识与技术等。

1. 研讨流程及其控制

为从技术上保证人机结合、从定性到定量、综合集成等相关要素的实现,该研讨厅雏形提出并采用了研讨流程和流程控制的概念。

研讨流程是指研讨进行的方式和步骤;研讨流程控制则是指对研讨流程予以适当的控制,使研讨以更有效的方式进行。在研讨中,首先界定研讨者的身份和权限,把参与研讨的用户分为若干级别,不同级别的用户具有不同的权限,其中某些用户可以在一定程度上干预研讨的进程,对研讨流程进行控制。通过不同用户角色对研讨流程不同层次的参与和管理,可保证研讨顺利、高效地进行。

此外从定性到定量和综合集成也都与研讨流程结合紧密,该研讨厅雏形同样采用"人机结合"的方法,提供必要的方法和手段,结合不同用户的主动参与作用来完成研讨过程,有力地保证了从定性到定量和综合集成的实现。

2. 人机结合

人机结合表现在专家对自己提出的意见可以用计算机进行建模,并对结果反复检验、修改直到得到一个专家满意的结果。而在意见整合过程中,对专家投票的统计、对专家给

出的判断矩阵的检验、一致性的计算等都需要用计算机来完成;另外,在讨论过程中专家有可能产生新的观点,对这些新的认识同样可用计算机建模方式检验、修改、完善,之后作为一种方案加入备选方案集合中,这些都是人机结合在技术层面上的实现。

3. 综合集成

综合集成在该雏形系统中有三个层次的实现:①信息的综合集成;②知识的综合集成;③智慧的综合集成。

信息的综合集成　对于信息的综合集成,在研讨厅中通过数据库、超级链接、BBS和搜索引擎等多种方式为专家提供了各种各样的经济信息资源,把位于不同位置、具有不同形式和结构的信息集成到研讨厅中,使得研讨厅本身成为一个综合的信息平台,为研讨提供了良好的经济氛围,同时专家可通过在BBS上发布数据、张贴文章,彼此之间达到信息的综合集成。

知识的综合集成　对于知识的综合集成,该雏形系统设计了一个知识的生产与服务机制,各种已有知识和专家本身的知识在研讨厅中互相交汇,共同为解决宏观经济的决策问题服务。另一方面,专家在研讨中获得的知识也对研讨起到促进作用,从研讨的中间过程和结论中同样可以生成新的知识供其他专家和以后的研讨使用,由此达到专家知识综合集成的目的。

智慧的综合集成　在研讨中,该研讨厅雏形提供了多种意见整合办法帮助各个专家主动从其他专家的智慧中吸取营养,尤其是针对专家从定性认识上升到定量认识中存在的困难,该雏形系统给出了一种有效的解决办法,其具体方法是是针对复杂的决策问题,当专家群体形成了几种认识时,在名义群体法和层次分析法的基础上使用群体一致性算法来统计专家群体的意见一致性程度,找出专家意见的分歧所在,经过反复的、有针对性的研讨,最终可以帮助实现专家群体思维的收敛,得到一个群体满意的结果。这些技术手段的应用使研讨厅成为综合集成专家智慧的场所。

(三)宏观经济方法、模型体系与模块整合技术

研讨厅体系作为一种方法论,与宏观经济这一具体领域相结合,势必将产生出新的经济方法、模型体系。目前,部分新的经济模型和方法(如宏观经济预警、预测模型、KDD建模方法等)已经开发出来,在开发这些方法模型的时候,同样采用了综合集成研讨厅体系作为指导思想。现在这些方法和模型已经通过统一的接口和调度方式集成在研讨厅雏形系统中,研讨者在研讨时可实现全过程的人机结合,同时这些方法和模型可辅助实现研讨由定性阶段向定量阶段的过渡。

由于容纳了宏观经济方法与模型体系,加上人机结合、综合集成等多项技术,综合集成研讨厅雏形系统本身成为一个庞大复杂的软件体系。对于体系内各个模块的整合,该研讨厅雏形系统采用了构件(Component)技术。

在实现上,首先把各种数据、信息、方法、模型的实现封装成构件,然后针对不同平台、

不同环境下构件的具体形式和结构,采取多种构件并重的方式,为各种构件提供统一接口。在不同的功能构件之间建立不同层次、不同形式的连接。这为综合集成研讨厅系统带来了极大的扩展性和开放性,使之成为了一个开放的集成软件平台。

三、支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅雏形的具体实现

(一)系统描述和运行环境

1. 系统框架

由系统框架示意图(图2)可以看到:综合集成研讨厅体系是一个结合了专家智能、机器(计算机)辅助分析与计算和以往知识积累的一个人机结合的研讨平台。上述三个体系与决策者交互作用,共同对经济问题进行探讨与决策分析,由此实现了支持宏观经济决策的综合集成研讨厅体系。

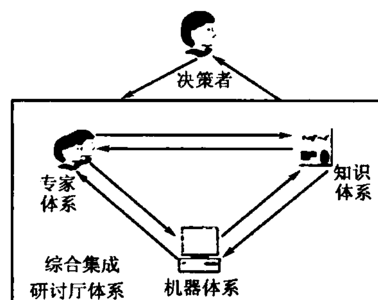


图2 系统框架示意图

2. 系统层次结构

从系统层次结构图(图3)可以看出,研讨厅体系是由客户层(研讨终端)、业务逻辑层(研讨环境、各种支持服务等)和数据层(包括数据库服务器、公共数据)组成的多层结构体系。

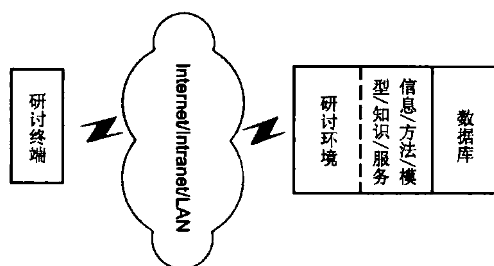


图3 系统层次结构图

研讨系统服务器是由位于局域网上的多台计算机组成。系统通过Web服务器管理用户的接入,用户可通过专线、ISDN或电话线来访问研讨厅。

3. 系统的软硬件环境

系统服务器采用高档微机、工作站或小型机,操作系统采用Windows NT/2000、Linux,客户端采用普通微机,操作系统可采用Windows 95/98/NT/2000,要求IE4.0以上。数据库可用MS SQL Server 7.0以上或Oracle 8.0以上,开发工具为Visual C++6.0、InterDev6.0、JBuilder 4.0等。

(二)系统模块划分与描述

如前所述,该研讨厅雏形系统从功能上可划分为三个中心:研讨中心、管理中心和数据中心。这三个中心分别由不同的模块组成:综合集成研讨厅网站、研讨终端、用户接入服务(包括WEB/EMAIL服务器)、系统管理模块、基本信息平台、宏观经济决策支持系统、系统支持工具等等。

1. 综合集成研讨厅网站

该网站提供了进入研讨厅系统的统一入口,是各主要模块的集成平台,它提供了大量的宏观经济信息、背景知识和有关的经济专题,为研讨厅营造了良好的经济氛围。

2. 研讨终端

用户(专家)使用研讨终端来参与宏观经济问题讨论、辅助决策,得出最终结论。其主要功能包括注册、登录、电子会议、研讨交互、结果显示、报告输出,等等。

3. 用户接入服务

用户接入服务模块,以 IIS 5.0 为系统框架,集成了身份验证、信息查询服务、宏观经济决策支持等各种后台服务模块。

4. 系统管理模块

系统管理模块主要为管理员提供系统维护服务,它又由用户管理系统、数据库管理系统、决策支持管理系统等组成。

5. 基本信息平台

主要完成内部通知、E - MAIL 服务、BBS 服务、电子会议、信息反馈、信息获取与交流等功能。

6. 决策支持系统

雏形系统的宏观经济决策支持系统包括多个应用系统:专家意见整合、集成系统;经济状态显示系统,预测系统,预警系统;定量分析与建模系统等等。并包括与应用体系相配套的数据信息体系和模型体系。

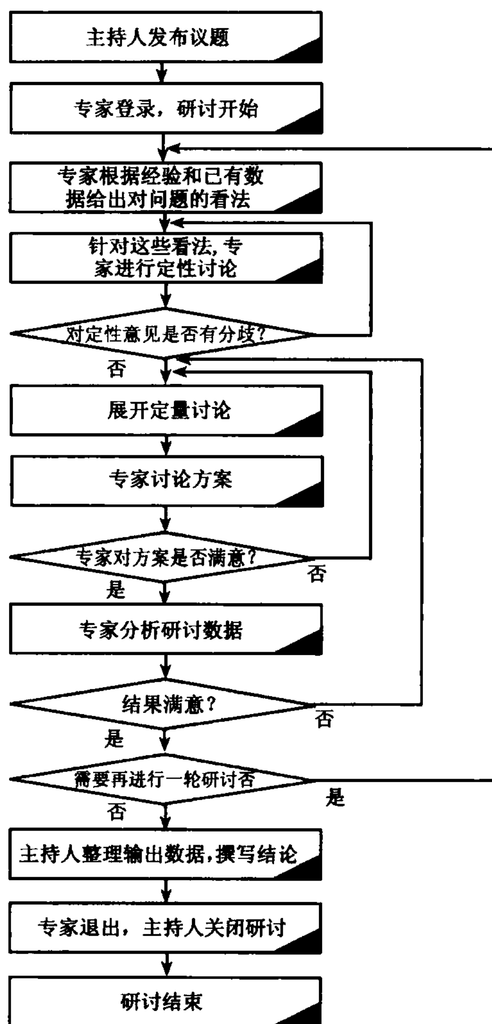


图 4 研讨过程图

7. 系统支持工具

包括各种其他与研讨厅管理有关的辅助工具。

四、专家使用研讨厅进行研讨和决策支持的过程及其特点

(一) 研讨过程

目前,该研讨厅雏形已经可以支持关于宏观经济问题决策(主要是预测和预警问题)的全过程研讨,其过程如下:

①某个用户(一般是经济专家)在BBS或信息平台上发布消息发起研讨;②该专家(或其他有意参与的专家)开启一个针对该议题的电子会议;③其他用户登录综合集成研讨厅网站,加入电子会议并参与研讨;④由主持人(一般由发起人或者著名专家担任)向与会专家公布研讨的议题和程序;⑤专家针对议题,根据自己的经验和已有数据发表对问题的看法;⑥针对各个专家的看法,专家进行定性讨论;⑦根据定性讨论的具体情况,研讨可以直接转入;⑧定量讨论,用数据、模型和方法来验证或论述自己的观点;⑨逐步深入,逐渐过渡到定量讨论阶段;⑩专家通过定性的和定量的研讨,最终得到一个针对具体问题的、专家群体普遍认可的一个或多个结论,这样一轮完整的研讨便告结束。

如果在进行完一轮的研讨后,专家的意见仍然是发散的,那么研讨可以重新开始,即再从定性讨论开始,这时,有了第一轮的研讨,专家对问题的认识深化,加上专家之间互相的影响和取长补短,某些专家的定性认识会发生变化,在此基础上的讨论将会比第一轮的研讨更加深入。这种研讨方式实际上是多种决策方式、会议方法的综合集成。

(二)支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨厅雏形系统的特点

由上面描述的研讨过程可以看出,综合集成研讨体系的三个重点:人机结合、从定性到定量、综合集成都在该研讨厅雏形中得到了一定的体现。

1. 全过程、以人为主的人机结合

与传统的决策支持系统不同的是,在该研讨厅雏形中实现的是全过程的人机结合,不仅在提出问题和分析结论时专家受到机器的帮助,在研讨的每个步骤,都有机器体系、知识体系的参与和帮助,这就和专家系统和传统决策系统的只在决策的开始和结束时有人的参与,但是中间过程人的作用无法体现形成了鲜明的对比。

另一方面,在人机结合的过程中,始终坚持以人为主,人在研讨中起着至关重要的作用,而不是完全依赖机器,这是因为开放的、复杂巨系统的问题由于本身的特性,传统的一些方法和手段已经无法正确、全面的解决这些问题,这时必须强调人的作用——专家利用自己的经验、知识、智慧,在一些辅助手段的帮助下,在与其他专家的交流过程中,逐步加深对问题的了解、逐渐认识到问题的各个层面和各个组成部分以及这些层面和部分之间的复杂关系,建立对这些关系和问题本身的定性以及定量化描述,这样才有可能真正分析并解决开放的、复杂巨系统的问题。

2. 多层面、多形式的综合集成

如前所述,该研讨厅雏形实现了信息、知识、智慧三个层次的综合集成,同时,在研讨中,针对不同阶段、专家意见分歧的不同程度,该雏形体系给出了多种意见整合方案,这些整合方案以各种形式介入研讨过程,促进专家思想的收敛,同时又允许个别专家观点的创新性突破。另一方面,在研讨中,通过反复的全过程迭代和局部迭代,专家们逐步分析复杂问题的各个层次、各个方面、各种影响因素,不同的意见互相交汇,不同的方法互相补充,将极有可能经过研讨得出一个包含了大部分专家智慧的,同时又是具有创新意义的

结论。

五、结　语

人机结合综合集成研讨厅体系是国内学者提出的解决开放的复杂巨系统问题的方法论,本文描述的研讨厅雏形系统把宏观经济系统作为研究对象,把研究开放的、复杂巨系统的方法论运用到宏观经济决策领域中,在技术上实现了一个可以应用并体现了这一方法论的研讨厅雏形。在该雏形中,人机结合、从定性到定量和综合集成等开放的、复杂巨系统的方法论中的主要要素都得到了体现,并为专家解决宏观经济领域内的复杂问题提供了一条行之有效的途径。

参 考 文 献

1 戴汝为 ."再谈开放的复杂巨系统"一文的影响 . 模式识别与人工智能, 2001.14(2): 129~134

2 戴汝为 . 大成智慧工程 . 冶金自动化, 2001(1):1~6

3 钱学森,于景元,戴汝为 . 一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论 . 自然杂志, 1990, 13(1): 3~10

4 钱学森手稿(1938~1955). 太原:山西教育出版社, 2000

5 中国科学院自动化所人工智能实验室 . 基于 Internet 的宏观经济决策综合集成研讨厅技术设计书 . 2001

6 中国科学院自动化所人工智能实验室 . 支持宏观经济决策的人机结合综合集成研讨体系研究,(国家自然科学基金重大项目 No.79990580 技术报告书).1999

基于智能信息主体的综合集成研讨厅软件体系研究

操龙兵　戴汝为

一、引　言

我们生活的世界正越来越紧密地相互联接在一起，这种相互连接性反映在自然、社会与人工系统的分布性、全局性与交互性的增强方面，如宏观经济决策、生态系统、Internet等。与此同时，我们所设计、构建、管理与使用的处理上述问题的信息系统正变得越来越开放、复杂、面向网络及人机协作，我们生活中最好的例子是 Internet。我国科学家称这类系统为开放的复杂巨系统（Open Complex Giant Systems，OCGS），并基于大量实践经验进一步指出处理这类系统的有效且可行的方法是构建综合集成研讨厅，该厅中人是问题求解的必要环节，采取人机结合以人为主的思想，工程应用方法是综合集成法（Metasynthetic Engineering，ME）。

近些年来分布式人工智能领域与计算机软件领域兴起的智能信息 Agent 技术以 Agent 和 Agent Society 处理开放的、智能的、分布式、包含多媒体信息复杂智能系统，所建立的 Multi - agent System 可以综合多种 Agent 技术，从而使 Agent 具有智能、分布性、适应性、反应性、移动性、群体性与方便的人机交互与协作能力等，这为构建集成了人的智慧与计算机的高性能的大规模、开放式专家群体参与的人机协作智能信息系统——研讨厅创造了技术条件。

经济系统中的宏观经济决策是一个非常复杂而重要的问题，属于开放的复杂巨系统范畴。我们的求解方法是采用综合集成法构建支持宏观经济决策的综合集成研讨厅。近年来，在重大基金项目的支持下，采用客户/服务器与浏览器/服务器等计算模式进行了原型系统的研究。本文介绍了一种新的探索策略，即采用智能信息主体技术，综合多种类型与功能的 Agents，如智能 Agent、适应性 Agent、协作 Agent、移动 Agent 等封装研讨厅中的除资源库之外的实体与功能，并赋予研讨专家与支持人用户 Agent。

本文的组织如下：在第二部分简要介绍综合集成研讨厅体系思想；第三部分介绍智能信息 Agent、Java 与 Aglet 平台；研讨厅所需的几类 Agents 和一种耦合了扩展请求器—中介器—供应器模型的嵌套的多层客户/主体/服务器（Client/Agent/Server）体系模式在第四部分进行阐述；第五部分给出了基于智能信息 Agent 的研讨厅框架；第六部分介绍分布式资源集成的方法与工作过程；在第七部分讨论了基于智能信息 Agent 构建研讨厅的设计特点与优势。

二、HWME—人机协作的综合集成智能系统

从人的心智、认知过程与当前的计算机体系结构可知,仅仅采用当前的计算机构建处理复杂问题的自主智能系统是不可行的,复杂智能系统的可行的设计方法是综合人的性智(如直觉、灵感、模式识别能力等)与计算机可以做的量智(如逻辑推理、分析等)。很明显,人机协作的策略是要在复杂智能问题的求解中综合补偿与发挥人与机的智能。

处理类似宏观经济决策之类的复杂巨系统问题的方法已经超越了还原论,研究与实践已经清楚的表明,有效而可行的办法是从定性到定量的综合集成,即综合集成法。这种方法是从大量实践中提炼、一般化与抽象的结果,其工程途径是构建针对特定问题的研讨厅。在该厅中,必须有机的综合专家群体、数据与信息、各相关学科的知识与理论,特别是人的经验与智慧,以上各方面组成了一个有机的整体,问题求解能力来自于以上各要素的整体优势的充分发挥。

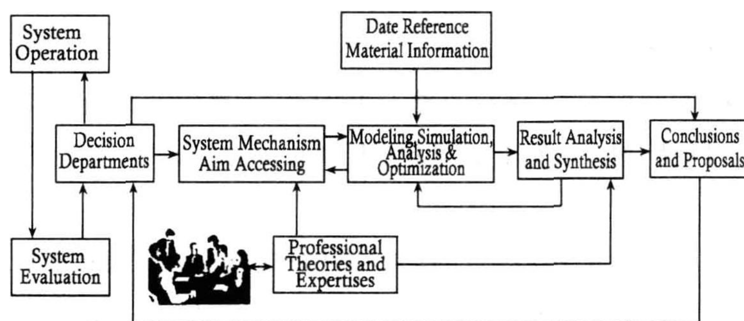


图 1 说明了综合集成的问题求解过程

三、智能信息主体、Java 和 Aglet 平台

Agent 的定义、机理与功能在不同的研究领域中可能差别较大。本文主要关注的是与构建分布式系统有关的软件领域的信息 Agent 与 DAI 中进行分布式问题求解的自主智能 Agent。后者是一种具有自主、适应性、社会能力、反应能力的实体,可以自行处理新的与人难以应付的情景,它采用 Agent 通信协议交换信息以进行自主问题求解。一些其他的技术标准可以使它具有个性化、协商与冲突消解能力。这类 Agent 一般具有特定的行为规则,遵照预设的规则,群体 Agents 之间交互并可以涌现出适应性与智能,从而实现分布式问题求解。对于信息 Agent,注意力主要集中在计算能力上,如分布式计算、协作计算、移动计算等。但是,随着学科的交叉,信息 Agent 的智能性研究与要求似乎理所当然,尽管目前智能的体现实际上还相当有限。备受分布式计算关注的移动 Agent 是可以从一台机器移动到其他机器以完成特定任务的智能信息Agent。在提交发送之后,移动 Agent 独立于发送客户机自主行动;到达服务器后,它被传递到一个 Agent 执行环境中;而一旦 Agent 拥有了必要的认证权限,其执行部分即可启动。为了完成任务,移动 Agent 可以继续移动到另一台

服务器，产生新的子 Agents，或者与其他的 Agents 进行交互，交互完后，将计算结果传递给发送客户机或者相关的服务器。

智能信息 Agent 技术要想获得成功，就必须在网络上相关的机器上采用一些适当的支持 Agent 运行的技术（服务软件包）。所选择的技术必须能够实现 Agent 的功能并体现其特点，而且具有一定的通用性。目前尚没有哪一种技术能够满足所有 Agent 的需求，相比而言，Java 技术是目前可用的最好的工具。Java 的独特之处在于它综合了编译与解释代码的能力，整合了开发语言与操作系统的运行机制，是一种面向对象的、解释型、强健的、安全的、与体系结构和平台无关的、轻型多线程语言，Java 执行码可以运行在任何安装有 Java 解释器或者 Java 使能器的 Web 浏览器的硬件平台上。Java 的另一个特点是其编译后的代码比较小。这些特点使得 Java 编译类可以高效的在网络上运行与传播，已经成为以网络为中心的计算的最具吸引力的技术。目前已经在网络中得到了广泛应用并拥有很大的市场接受度。Java 数据库连接技术（JDBC）是 Java 访问和操作关系数据库的标准规范。Java 技术的上述特点赢得了 Agent 研究者的青睐，实际上已经和正在开发的大多数 Agent 采用了 Java 技术。

IBM Aglet Workbench 是最早设计的基于 Java、具有代表性、支持升级、结构简洁、开放与易于扩展的移动 Agent 平台，受到相对多的欢迎。

四、嵌套的多层 Client/Agent/Server 体系模式

Agent 技术是一种新的强大的计算模式，具有基于逻辑与基于算法的交互计算能力。基于 Agent 的分布式计算的优势可以归纳为四种综合：即算法与交互的综合、跨学科的多种类型 Agent 技术的综合、多种面向 Agent 设计模式的综合、多种工作机制的综合等。研讨厅是一个分布式系统，基于 Agent 的综合集成研讨厅集成多种类型的Agents，主要是体现智能的信息 Agent，在目前的工作中，主要采用体现智能的移动 Agent（Intelligent Mobile Agent），这种 Agent 不仅具有强大的支持分布式应用集成的移动与分布计算能力，而且充实了自主性与适应性。

本文中基于 Agent 的宏观经济决策研讨厅软件体系的策略是，采用智能移动 Agent 封装支持宏观经济决策的研讨厅中的任务、应用、算法、交互、角色、控制与管理，以及数据操作。为了支持基于智能移动 Agent 的研讨厅，定义了如下几类 Agent 组件。

（1）Role Agent：针对专家、主持人、管理员三个角色提供权限、功能、资源等交互界面与工具；具有主从、公私等地位之别。

（2）Interface Agent：提供 Role 完成研讨所需的研讨模板、方式、记录、报告显示，数据分析、信息显示、资源调用、可视建模、知识开发等交互界面。

（3）Mediator Agent：Aglet 类扩展，主持人所在的中介端及由此端移动到请求端节点上的执行控制与业务逻辑调度，进行全局交互。如研讨启停、角色与权限的定义与控制、流

程与状态管理、业务逻辑与资源调度等。

(4) Resource Agent: Aglet 类扩展,位于特定资源节点上封装模型、方法、意见综合等算法,以及这些资源的信息交互与管理等。

(5) Execution Agent: Aglet 类扩展,由 Role、Interface、Mediator 等调度(静态)或以个体/包的形式派遣到相应节点上(移动),执行请求、发布或搜索信息、报告服务、执行工作流,根据所达节点的需求,可能还会移动到其他节点上执行特定功能(如秘密研讨)。

(6) Resource Gateway Agent:位于各资源端,由多个 Coordinator 组成,与进入的资源请求 Agents 协作,与资源库和/或应用服务交互完成资源请求。

整个系统采用了内嵌扩展的请求器—中介器—供应器模型(Requester - Mediator - Provider)的企业级的客户/服务器计算模式(见图 2),并扩展成嵌套的多层客户机/主体/服务器计算体系,是一个三层体系,即请求层、中介层、供应层。一个 Tahiti Aglet 服务器预装在每台机器上,作为本机的计算服务器;客户服务是本地静态 Agents 和/或到达的移动 Agents,运行在 Agent 服务器上;一个 Agent 中间层——Mediator Agents 加入到各节点,用于全局交互。图 3 描述了嵌套的多层模式。请求层完成研讨专家的请求/响应,是用户与机器的交互接口,接收用户请求、显示返回的结果,所有的移动 Agents 是从中介层以包的形式一次性发送过来,这些移动 Agents 与本地的静态 Agents 进行交互,或者继续被传递到目标节点。中介层是主持人端,控制研讨进程与业务逻辑调度等,由多个 Mediator Agents 组成,是研讨厅中移动 Agents 的起源地与控制中心,而且是分布式计算与信息应用集成的调度器与业务逻辑管理中心,发布移动 Agents 到目标节点,管理这些移动 Agents 的状态

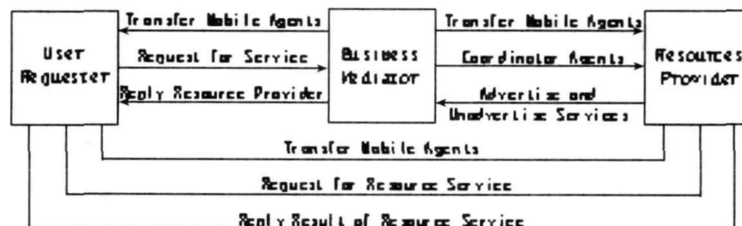


图 2 Requester - Mediator - Provider 模型

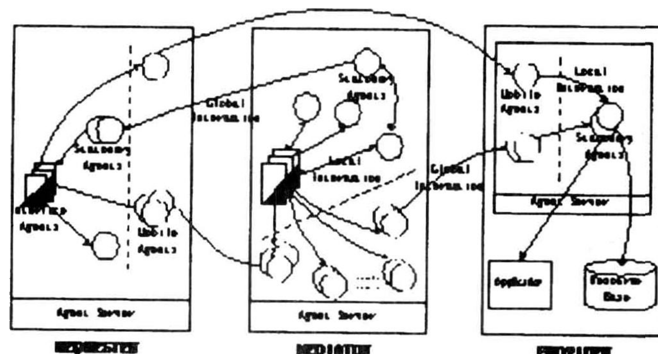


图 3 Nested N - Tier Client/Agent/Server Scheme

(proxy)、巡游计划与生命周期,注册资源与服务,协调请求器与供应器的协作。供应层支持多种资源服务与管理,向中介层报告服务,包括多个分布式的宏观经济模型与方法应用、意见整合应用、知识库与应用、宏观经济数据库、研讨厅系统数据库等应用,通过网关与协调 Agents(Gateway/Coordinator)与相关节点协作,提供决策支持服务,给请求端返回结果,第六部分介绍了分布式应用的集成的工作过程。

五、基于智能信息主体的宏观经济决策研讨厅框架

图4反应了支持宏观经济决策的综合集成研讨厅体系结构,共包括六层,即人机界面层、决策目标层、综合集成层、网关层、资源服务层与基础设施平台层。界面层是专家与其 Role/Interface Agents 进行交互的地方,这些 Agents 支持大量的用户接口,如可视化的查询工具、建模工具、知识开发器、数据分析工具等。决策支持层为决策目标与分析服务,如提供月度、年度经济预报、经济运行预警、长期与中期规划、多目标评价、景气分析等。研讨厅所涉及的资源服务包括分布式数据库与数据库管理系统、模型方法库与管理系统、知识库与管理系统,由不同的资源 Agents 与执行 Agents 完成。进行分研讨的多个分布式研讨厅通过 Sub－Seminar 协作网关进行协调,由中介层进行封装协作,确定那个资源具有相关的研讨信息,分解并发出请求,综合从分布资源得到的部分结果。研讨厅所运行的基础设施由 Internet 与 Intranet 组成。

<table>
<tr><td colspan="5">Human Agent Interface Services</td><td>INTERFACE</td></tr>
<tr><td colspan="5">Decision Target Services</td><td>DECISION-MAKING</td></tr>
<tr><td colspan="5">Metasynthesis Seminar Services</td><td rowspan="2">META-SYNTHESIS</td></tr>
<tr><td colspan="5">Metasynthesis Support Services</td></tr>
<tr><td colspan="4">Sub-Seminar Collaborative Gateway</td><td>Database Gateway</td><td>GATEWAY</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sub_ Seminar A</td><td rowspan="2">Sub_ Seminar B</td><td rowspan="2">…</td><td rowspan="2">Sub_ Seminar N</td><td>Resources Managers</td><td rowspan="2">RESOURCES SERVICES</td></tr>
<tr><td>Resources Bases</td></tr>
<tr><td colspan="5">Infrastructure & Platform(Internet/Intranet)</td><td>PLATFORM</td></tr>
</table>

图4　综合集成研讨厅体系架构

基于智能信息 Agents 的分布式研讨厅雏形通过 Internet 分布于多个节点,每个节点是一个 Intranet 或者位于一个 Intranet 上。系统通过 Mediator Agents 进行信息的检索、查询与协作,分解与执行相关资源的复杂查询,组合从多个信息资源得到的部分响应结果,与 Role/Interface 进行协作。值得指出的是,参加研讨的专家与主持人是系统的组成要素之一,参与在线的宏观经济决策的研讨,并通过他们的代理——Role Agents与研讨厅的其他 Agents 进行交互,授权 Role 实施自己的计划与动机。为了降低对系统网络平台的性能需求,分别在相关的数据库与资源服务服务器上建立数据库网关 Agents 与特定应用网关 Agents,这些 Gateway Agents 等候在相关资源节点,监视与服务进人的请求 Agents 的动机与需求,作为供应端向中介端广播相关服务功能、接口与本地的变化。

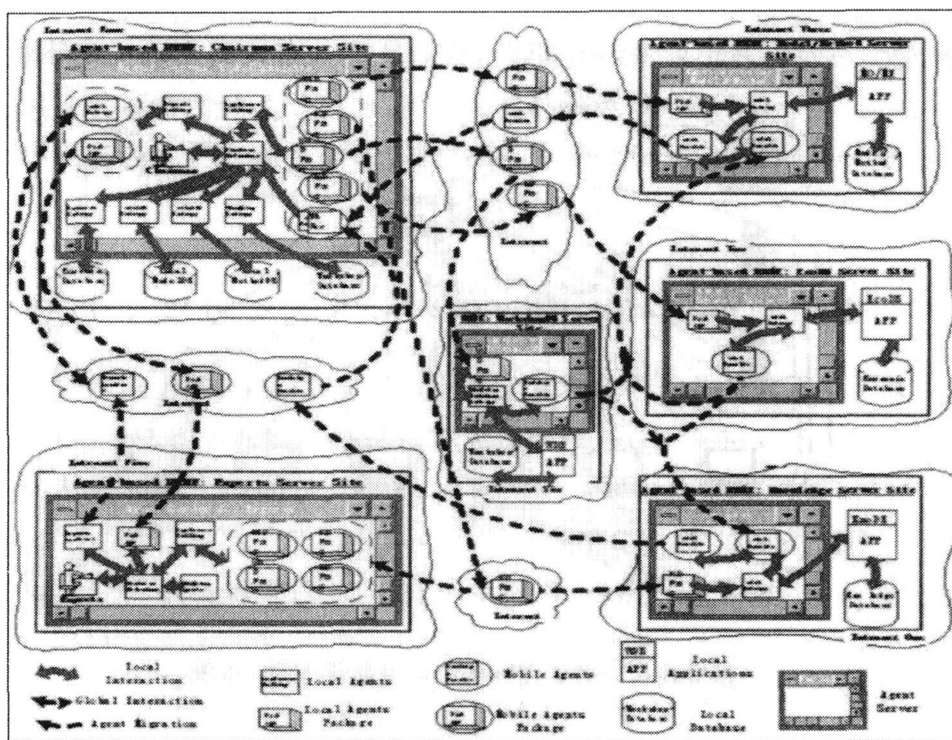


图 5 基于智能移动 Agents 的 HWME 框架

六、基于智能信息主体的分布式资源集成

基于智能信息 Agent 的分布式资源集成系统的工作过程与生命周期如图 6 所示,图中以访问采用神经元网络的宏观经济预测模型应用为例说明系统的计算模式与工作过程。该系统包括三个数据库服务器 (即宏观经济数据库服务器、系统运行数据库服务器和宏观经济知识库服务器),六个决策支持应用工作站(即计量经济模型应用、系统重构模型应用、神经元网络模型应用、贝叶斯网络模型应用、关联规则模型应用、意见整合应用如 NG, Delphi, AHP 等),一个中介服务器 (支持业务逻辑与移动计算)和多个专家客户机等。在图 6 中,采用不同的颜色与标记 (从 S1 到 S8,对应下文中的 step 1 到 step 8)描述系统生命周期的每一步。

系统的工作过程如下,需要调用神经元网络经济预测模型应用的专家从请求端通过 Interface Agent 向中介端发送一个 Startup 请求移动 Agent(step1);中介端收到后检查支持该请求端运行的所有 Mediator/Execution Agents 是否都已经发送过去,并检查是否所有的供应端均已经进行注册并报告了相关的资源服务信息 (如网络位置、安全证书等),如果没有,则向相应的供应端并行的发送 Register Agents,通知各端立即进行注册与服务申报,中介器对所收到的供应端信息进行分类处理,并向上述请求端发送准备好信息(step 2);请求器接收并向中介端传送用户输入参数和调用基于神经元网络的宏观经济预测模型应用的服务请求 (step 3);中介器辨识并检验请求的有效性,将服务请求分解为对应相关系统数据库、

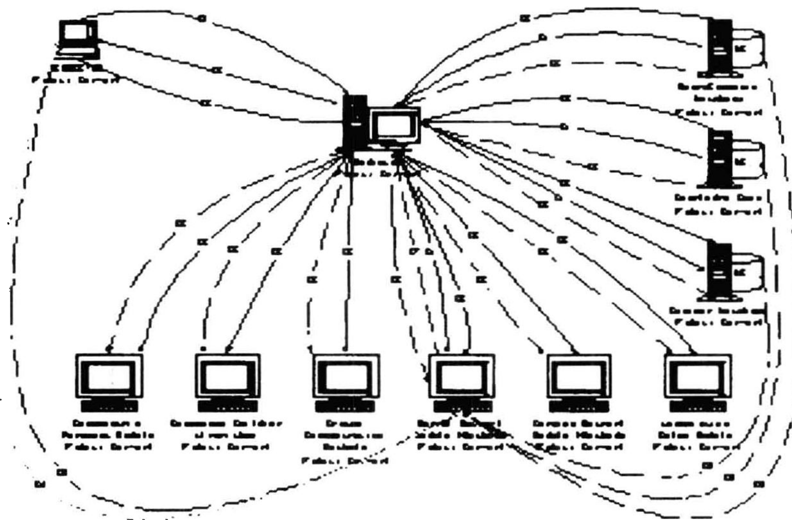


图6 基于智能移动 Agent 的分布式资源集成

宏观经济数据库、知识库和神经元网络预测模型应用的多个操作请求，然后向各服务端发送 Coordinator (step 4)；到达各服务端的 Coordinator 与本地 Agents 进行交互，执行神经元网络模型应用，在此执行过程中，神经元模型机器上的 Coordinator 采用消息机制与该应用所涉及的数据库端和发出调用请求的请求端上 Coordinators 协作操作执行应用所需的数据与规则等(图中以虚线表示)(step 5)；神经元预测模型的执行结果报告到发出请求的请求端，并以可视化的形式显示在用户界面上 (step 6)；通知中介端本次访问操作结束(step 7)，中介端决定是否销毁所有发出的移动 Agents 而退出系统 (step 8) 或者继续执行其他的请求。从 step 6 到 step8，执行是通过消息机制完成的。系统对其他资源的请求的执行过程或多或少的类似于上述工作过程与生命周期。在这些操作中，消息机制得到充分的应用，以降低中介器和每个资源服务器的负载，提高并行计算的响应性能。

为了降低对系统网络平台的性能需求，设计资源 Gateway Agents，包括数据库 Gateway Agents (可以动态的获得所采用的 JDBC 驱动程序、数据源和安全信息等，充当所进入的 Coordinator Agents 与数据库管理系统之间的媒介，并与数据库管理系统进行交互)和特定应用 Gateway Agents(维护支持特定应用运行所需的数据等信息)，分别驻留在分布的数据库与资源服务的服务器端，向中介端广播各自的服务与变化信息等，监视并协同进入的 Coordinator Agents 以完成用户请求。

七、设计考虑

为了支持基于智能信息 Agent 的分布式多数据库与应用的集成，同时维持好的系统性能，系统中采用了强健而高效的工作机制与 Agent 设计模式，其他两个方面的综合亦得到了灵活的体现。系统广泛采用了移动的 Aglets 执行分布式计算，但是，并非所有的分布式执行的操作都是采用发出移动 Aglets 完成的，当移动的 Aglets 到达目的地后，消息机制得

到了足够的应用,许多的功能是由移动 Aglets 通过消息完成的。另一方面,灵活采用了多种针对 Aglets 旅行、任务实施和交互的设计模式以优化系统设计模式与性能。多种具有不同目的的面向 Agents 的设计模式得到综合应用,例如任务中的主从模式、旅行中的巡游模式和交互中的信史模式等的集成,以协作和集成多个相关的分布式应用与数据库。另外,移动 Agents 是层次式,即移动 Agent(父 agent)可以根据需要产生子移动 Agents(子 agent),每个移动 Agent 是包含其中的其他移动 Agents 的容器,这些 Agents 层次性、动态的组织起来执行相应的任务。

在研讨厅的分布式客户端与分布式资源集成中,通过移动 Agent 实现的移动计算能力集成到分布式计算中。Agent 的移动性与消息传递工作机制进行了综合。而且对哪些功能应由移动 Agents 执行而另一些功能应由静态 Agents 或消息完成进行了分工。用户客户端即请求端不像传统的客户/服务器模式中那样肥而且专门化,确切地说就是客户端变得轻便而且可移动。在初始化阶段,多种功能性的移动 Agents 通过多线程的并行机制被发送到相关的机器,而且在执行过程中的信息交换与任务的实施是通过消息机制完成的,这就降低了网络带宽与响应时间。上述移动 Agent 的应用考虑对于改善分布式系统的设计是有效的。体系结构中所添加的中介层是研讨厅主持人角色的需要,是用户请求与服务供应之间的媒介,将所有相关的资源与应用关联起来,是移动 Agent 的调度器与生命周期的管理器,是分布式计算的业务逻辑中心。各节点上的中介 Agents(主要是移动 agents)在各端处理全局性操作,对于信息的分布是至关重要的,使得系统虽然有一个 Mediator 层但是各 Agent 的活动却是相对自由的,从而削弱了分布式计算中存在一个主导进程与流程的控制中心的弊端。而那些 Gateway 为访问本地资源提供了通用网关,可以避免经常从中介端下载移动 Agents 到请求端,而且可以避免异种数据库 JDBC 驱动程序的下载与初始化,使得系统支持弱连接网络,并且增强了通用性。总而言之,研讨厅所采用的基于智能信息主体技术的嵌套式多层 Client/Agent/Server 设计体系,综合了多种类型的 Agent 技术与多层计算体系的优势,对传统的客户/服务器计算体系进行了扩展,并综合了移动计算与分布式计算。

智能信息主体是智能的主动组件,具有自主、反应与前摄能力,可以根据动态网络环境调整路线与活动内容,如当目标节点无法到达或者 Aglet 服务器服务失效时,移动 Agent 可以自行决定该移到何处及下一步该做些什么。

八、结 论

在信息系统中,开放的复杂智能系统的研究越来越受到关注,支持宏观经济决策综合集成研讨厅即是一个例子,研讨厅综合了高新信息技术、数据融合、知识与信息以及专家群体智能。Multi - agent 技术是处理这类系统的一种可行而有效的方法。本文介绍了综合集成研讨厅体系思想;给出了一个基于 Java 的智能信息主体技术即扩展的 Aglet Workbench

的研讨厅框架，采用移动 Agent 实现的移动计算集成到分布式计算中；详细讨论了宏观经济决策所需的包括宏观经济信息数据库服务、系统运行数据库服务、宏观经济模型与方法服务、意见整合服务等分布式资源集成的实现途径与工作过程。在该体系结构中，采用了一种合成了扩展请求器 - 中介器 - 供应器模型的嵌套的多层客户/主体/服务器设计体系，灵活地综合了 Agent 的移动性与消息机制、算法与交互、多种类型的 Agent 技术、多种 Agent 设计模式。

参考文献

1 钱学森，于景元，戴汝为．一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论．自然杂志，1990，13(1)：3 ~ 10

2 王寿云等．开放的复杂巨系统．杭州：浙江科学技术出版社，1995

3 戴汝为，王珏，田捷．智能系统的综合集成．杭州：浙江科学技术出版社，1995

4 Wooldridge M. and Jennings N. *Intelligent agents: Theory and Practice*, Knowledge Engineering Review, Volume 10 No 2, 1995

5 Matthias Klusch, *Intelligent Information Agents*, Springer, Germany, 1998

6 Cao L B. *N ~ Tier Agent - based Architecture of HWME Prototype for Macroeconomic Decision Support System*, Technical Report, CASIA, China, 2001

7 Harrison C G, Chessm D M, Kershenbaum A, *Mobile Agents: Are They a Good Idea*, Research Report, IBM Research Division, 1995

8 Decker K, Sycara K, Williamson M, *Middle - agents for the Internet*, Proceeding of IJCAI - 97, Japan, 1997

9 Comer D E, *Computer Networks and Internet* Prentice Hall, USA, 1996

10 IBM Aglets Workbench Page: www.trl.ibm.co.jp

11 Cao L B. *Intelligent Mobile Agents for Distributed Resources Integration*, 技术报告, 2001

12 Erich Gamma et al, *Design Patterns: Elements of Reusable Object - Oriented Software*, Addison Wesley, 1998

13 Aridor Y, Lange D B, *Agent Design Patterns: Elements of Agent Application Design*, Proceeding of Autonomous Agents'98, ACM Press, 1998

基于 Linux 操作系统的开放式工业机器人实时控制研究[1]

徐德 景奉水 谭民

一、引言

由于工业机器人的逆运动学求解复杂,占用机时较多,对工业机器人的实时控制带来不利影响。而且在直角坐标系进行空间运动规划后难以保证各关节运动平稳,一旦某一关节的关节角出现突变,一般需要重新规划,这样会严重影响控制的实时性。因此,简化逆运动学的求解,提高规划的有效性,对提高工业机器人控制的实时性、拓展工业机器人的应用范围具有重要意义。

机器人逆运动学求解主要有几何投影法和解析法,二者各有特色。针对具体的工业机器人而言,如 PUMA、YASKAWA 等,利用几何投影法计算 $\theta_1 \sim \theta_3$ 比较直观,计算量较小,但对 $\theta_4 \sim \theta_6$ 的处理较复杂。解析法虽然计算量大,但在已知 $\theta_1 \sim \theta_3$ 的情况下,$\theta_4 \sim \theta_6$ 的求解就变得比较容易。因此,我们结合几何投影法和解析法优点,提出了一种针对 YASKAWA 工业机器人的逆运动学求解方法,大大减少了逆运动学求解的计算量。

我们利用实时性较好的 Red Hat Linux 作为工业 PC 的操作系统,由工业 PC 进行在线运动规划、逆运动学求解、选出控制解等,由 PMAC 多轴运动控制器实现运动控制,构成工业机器人的实时控制系统。实验表明,本文提出的逆运动学求解方法正确,构成的控制系统实时性强。

二、K10 工业机器人坐标系的建立与逆运动求解

(一) K10 工业机器人坐标系

针对 K10 工业机器人的结构,建立 D-H 坐标系如图 1 所示。相应的 D-H 参数见表 1。

表 1 K10 工业机器人的 D-H 参数

D-H 参数	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
a_i	200	600	115	0	0	0
d_i	585	0	770	0	0	100
α_i	$-90°$	0	$-90°$	$90°$	$-90°$	0
θ_i	θ_1	$-90° + \theta_2$	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6

[1] 本文受国家“863”项目资助(980403)中国科学院创新基金资助(2F01J04)。

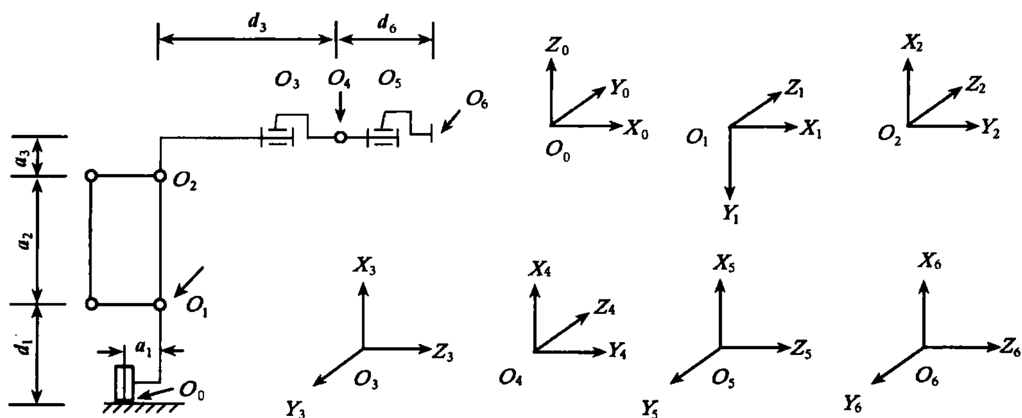


图 1 YASKAWA K10 工业机器人结构与坐标系

各个关节的状态转换矩阵为：

$$A_1 = \mathrm{Rot}(Z_0,\theta_1)\mathrm{Trans}(a_1,0,d_1)\mathrm{Rot}(X_0,\alpha_1) = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & a_1c\theta_1 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & a_1s\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \mathrm{Rot}(Z_1,-90^\circ+\theta_2)\mathrm{Trans}(a_2,0,0) = \begin{bmatrix} s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2s\theta_2 \\ -c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & a_2c\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \mathrm{Rot}(Z_2,\theta_3)\mathrm{Trans}(a_3,d_3,0)\mathrm{Rot}(X_2,\alpha_3) = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & a_3c\theta_3-d_3s\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & a_3s\theta_3+d_3c\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \mathrm{Rot}(Z_3,\theta_4)\mathrm{Rot}(X_3,\alpha_4) = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \mathrm{Rot}(Z_4,\theta_5)\mathrm{Rot}(X_4,\alpha_5) = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \mathrm{Rot}(Z_5,\theta_6)\mathrm{Trans}(0,0,d_6) = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在基坐标系 O_0 中的手部位姿为：

$$T = A_1A_2A_3A_4A_5A_6$$

(二)奇异位姿

对于 K10 工业机器人，当 $\theta_5 = 0$ 时形成奇异位姿。

当 $\theta_5 = 0$ 时，$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$。于是，有：

$$A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c(\theta_4+\theta_6) & -s(\theta_4+\theta_6) & 0 & 0 \\ s(\theta_4+\theta_6) & c(\theta_4+\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式说明当 $\theta_5 = 0$ 时，关节 4、5、6 这 3 个关节已退化为一个关节。可见，当 $\theta_5 = 0$ 时，有无穷多组 θ_4、θ_6 构成同一位姿，即逆运动学求解会有无穷多组解。

(三)工业机器人的逆运动学求解

逆运动学求解有几何投影法和解析法。几何投影法比较直观，计算量较小，但要求最后三轴交于一点，而且未考虑机械手末端工具的位姿。另外，几何投影法对奇异位姿的处理困难。解析法通用性较强，但计算量较大，用于机器人实时控制时影响控制的实时性。鉴于 K10 工业机器人的奇异位姿发生于 $\theta_5 = 0$ 时，因此，利用投影法求解 $\theta_1 \sim \theta_3$，利用解析法求解 $\theta_4 \sim \theta_6$。设手部位姿为：

$T_6 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$，而 $A_6^{-1} = \begin{bmatrix} c\theta_6 & s\theta_6 & 0 & 0 \\ -s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$，所以有：

$$T_5 = T_6A_6^{-1} = \begin{bmatrix} T_{11}c\theta_6 - T_{12}s\theta_6 & T_{11}s\theta_6 - T_{12}c\theta_6 & T_{13} & -T_{13}d_6 + T_{14} \\ T_{21}c\theta_6 - T_{22}s\theta_6 & T_{21}s\theta_6 - T_{22}c\theta_6 & T_{23} & -T_{23}d_6 + T_{24} \\ T_{31}c\theta_6 - T_{32}s\theta_6 & T_{31}s\theta_6 - T_{32}c\theta_6 & T_{33} & -T_{33}d_6 + T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将手部位姿 T_6 投影到 T_5 后,利用投影法可方便地获得 4 组 $\theta_1 \sim \theta_3$,具体求法从略。下面简要介绍 $\theta_4 \sim \theta_6$ 的求解。

由 $T = A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ 得:

$$A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}TA_6^{-1} = A_4A_5 \tag{1}$$

将 A_1^{-1}、A_2^{-1}、A_3^{-1}与 T_5 代入式(1)左端,有:

$$A_3^{-1}、A_2^{-1}、A_1^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3^{-1}、A_2^{-1}、A_1^{-1}T_6A_6^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:$b_{11} = c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3$;

$b_{12} = s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3$;

$b_{13} = c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3$;

$b_{14} = -a_1 s\theta_2 c\theta_3 - a_1 c\theta_2 s\theta_3 - d_1 c\theta_2 c\theta_3 + d_1 s\theta_2 s\theta_3 - a_2 c\theta_3 - a_3$;

$b_{21} = s\theta_1$;

$b_{22} = -c\theta_1$;

$b_{31} = -c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3$;

$b_{32} = -s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 + s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3$;

$b_{33} = -c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_2 c\theta_3$;

$b_{34} = a_1 s\theta_2 s\theta_3 - a_1 c\theta_2 c\theta_3 + d_1 c\theta_2 s\theta_3 + d_1 s\theta_2 c\theta_3 + a_2 s\theta_3 - d_3$;

$c_{11} = (b_{11}T_{11} + b_{12}T_{21} + b_{13}T_{31})c\theta_6 - (b_{11}T_{12} + b_{12}T_{22} + b_{13}T_{32})s\theta_6$;

$c_{12} = (b_{11}T_{11} + b_{12}T_{21} + b_{13}T_{31})s\theta_6 + (b_{11}T_{12} + b_{12}T_{22} + b_{13}T_{32})c\theta_6$;

$c_{13} = b_{11}T_{13} + b_{12}T_{23} + b_{13}T_{33}$;

$c_{14} = -(b_{11}T_{13} + b_{12}T_{23} + b_{13}T_{33})d_6 + (b_{11}T_{14} + b_{12}T_{24} + b_{13}T_{34}) + b_{14}$;

$c_{21} = (b_{21}T_{11} + b_{22}T_{21})c\theta_6 - (b_{21}T_{12} + b_{22}T_{22})s\theta_6$;

$c_{22} = (b_{21}T_{11} + b_{22}T_{21})s\theta_6 + (b_{21}T_{12} + b_{22}T_{22})c\theta_6$;

$c_{23} = b_{21}T_{13} + b_{22}T_{23}$;

$c_{24} = -(b_{21}T_{13} + b_{22}T_{23})d_6 + (b_{21}T_{14} + b_{22}T_{24})$;

$c_{31} = (b_{31}T_{11} + b_{32}T_{21} + b_{33}T_{31})c\theta_6 - (b_{31}T_{12} + b_{32}T_{22} + b_{33}T_{32})s\theta_6$;

$c_{32} = (b_{31}T_{11} + b_{32}T_{21} + b_{33}T_{31})s\theta_6 + (b_{31}T_{12} + b_{32}T_{22} + b_{33}T_{32})c\theta_6$;

$c_{33} = b_{31}T_{13} + b_{32}T_{23} + b_{33}T_{33}$;

$c_{34} = -(b_{31}T_{13} + b_{32}T_{23} + b_{33}T_{33})d_6 + (b_{31}T_{14} + b_{32}T_{24} + b_{33}T_{34}) + b_{34}$。

式(1)右端为 $A_4A_5=\begin{bmatrix} c\theta_4c\theta_5 & -s\theta_4 & -c\theta_4c\theta_5 & 0 \\ s\theta_4c\theta_5 & c\theta_4 & -s\theta_4s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & 0 & c\theta_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

根据式(1)左、右两端各个元素分别相等,计算 $\theta_4\sim\theta_6$。首先根据 $\theta_1\sim\theta_3$ 的值,计算 $b_{11}\sim b_{34}$。然后由 $c_{32}=f_{32}$,求得 θ_6。

若 $b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}=0$,且 $b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}\neq 0$,则 $\theta_6=\pi/2$ 或 $-\pi/2$。

若 $b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}\neq 0$,且 $b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}=0$,则 $\theta_6=0$ 或 π。

若 $b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}\neq 0$,且 $b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}\neq 0$,则:

$$\theta_6=\begin{cases} \mathrm{arctg}\left(-\dfrac{b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}}{b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}}\right) \\ \pi+\mathrm{arctg}\left(-\dfrac{b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}}{b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}}\right) \end{cases} \tag{2}$$

若 $b_{31}T_{11}+b_{32}T_{21}+b_{33}T_{31}=0$,且 $b_{31}T_{12}+b_{32}T_{22}+b_{33}T_{32}=0$,由 $c_{31}=f_{31}$,有 $s\theta_5=0$说明机器人处在奇异位姿,取 θ_6 等于上次的值。

求得 θ_6 后,计算出 $c_{11}\sim c_{34}$。由$\begin{cases} c_{12}=f_{12} \\ c_{22}=f_{22} \end{cases}$和$\begin{cases} c_{31}=f_{31} \\ c_{33}=f_{33} \end{cases}$惟一确定的一组 θ_4、θ_5。

$$\begin{cases} \theta_4=\mathrm{arctg}\left(\dfrac{-c_{12}}{c_{22}}\right) \\ \theta_5=\mathrm{arctg}\left(\dfrac{c_{31}}{c_{33}}\right) \end{cases} \tag{3}$$

利用 c_{11}、c_{13}、c_{14}、c_{21}、c_{23}、c_{24}、c_{34}是否与 f_{11}、f_{13}、f_{14}、f_{21}、f_{23}、f_{24}、f_{34}分别相等,判定 $\theta_1\sim\theta_6$ 是否是正确解。若上述各项分别相等,则该组 $\theta_1\sim\theta_6$ 是正确解;否则,不是解。每一个 θ_6 可以惟一的确定一个 θ_4、θ_5,因此利用两个不同的 θ_6 值可以获得两组 θ_4、θ_5。

对投影法求得的各组 $\theta_1\sim\theta_3$,分别利用式(2)、(3)求解获得 $\theta_4\sim\theta_6$,从而获得给定位姿的逆运动学的所有解。

三、运动规划与解的选取

运动规划采用直角空间运动规划和关节空间运动规划相结合的方法。在 O_0 坐标系中进行直角空间运动规划,计算出一个规划点的位姿后,利用二(三)中的方法进行逆运动学求解,获得若干组 $\theta_1\sim\theta_6$,从中选出一组作为控制解用于运动控制。控制解的选取利用式(4)判据:

$$J=\sum_{j=1}^{6}\{Factor[j]*fabs(Theta_L[j])*Sig_factor[j]\} \tag{4}$$

其中,$Factor=\{5.0,4.0,2.0,1.0,1.0,1.0\}$,为关节 1~6 的加权系数。

$fabs(Theta_L[j])$为关节 j 本次的关节角与上次关节角的差的绝对值。

Sig _factor[*j*]为关节 *j* 的增量符号系数。当本次的关节角与上次关节角的差的符号和上次的关节角与上上次关节角的差的符号相同时，该系数取 0.5；否则取 1.0。

对各组 $\theta_1 \sim \theta_6$，分别计算 J，取 J 最小的一组解作为控制解。这样选出的控制解，$\theta_1 \sim \theta_3$ 变化较小，关节角增量的符号变化少，有利于工业机器人的运动平稳。

一般地，通过直角空间运动规划，两个规划点之间各个关节的关节角变化不大，可以直接用于运动控制。但是，当规划点在奇异位姿附近时，θ_4、θ_6 变化较大，而 $\theta_4 + \theta_6$ 变化不大。基于这一特点，当 θ_4、θ_6 变化较大时，利用关节空间运动规划对其进行插补。

直角空间运动规划和关节空间运动规划，采用抛物线加直线的形式，起始段和结束段采用抛物线，中间段采用直线。

四、工业机器人的实时控制

(一)控制系统硬件构成

控制系统由工业 PC、PMAC 多轴运动控制器、6 个伺服控制器、YASKAWA K10 工业机器人本体等构成，见图 2。工业 PC 用于在线运动规划、逆运动学求解、选出控制解等，并将获得的以关节坐标表示的控制解转化为以光电码盘的码盘值表示的关节电机位置，传送到 PMAC 多轴运动控制器。PMAC 多轴运动控制器与工业 PC 通过 ISA 总线相联，它以接收到的关节电机位置作为给定，通过伺服控制器实现带速度闭环的位置控制。PMAC 多轴运动控制器具有很强的运动控制功能，其控制周期约为 40μs，采用 PID 控制算法，并提供阶式位置伺服环滤波器。具有运动速度设定和加速度限定，对于各次给定的关节电机位置可以实现线性插值或三次样条插值。因此，在该工业机器人的实时控制系统中，我们将运动控制完全交给 PMAC 多轴运动控制器实现，而利用工业 PC 进行关节电机位置的给定。

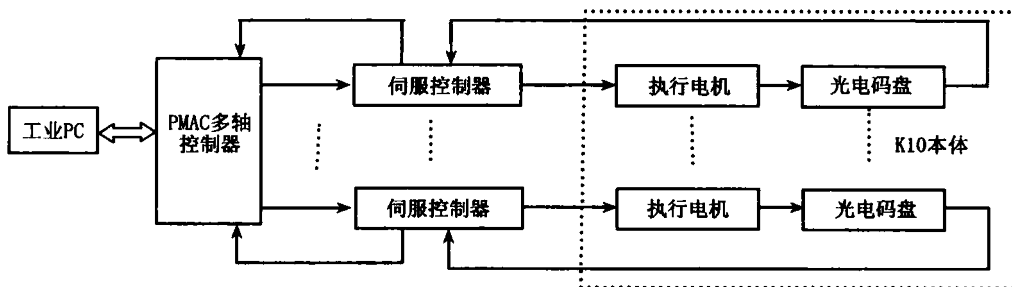


图 2 控制系统硬件构成

(二)控制系统软件

虽然 PMAC 多轴运动控制器本身具有很好的实时控制特性，但是，若关节电机位置不能及时给定，则工业机器人的控制实时性和运动平稳性变得很差。鉴于工业 PC 所用的操作系统、逆运动学求解的方法对关节电机位置的及时给定影响较大，我们选用实时性较好的 Red Hat Linux 作为工业 PC 的操作系统，采用本文方法求解逆运动学、选择控制解。

该实时控制系统不需要对PMAC多轴运动控制器编程，只需对其进行参数设置即可。工业PC的控制软件框图如图3所示。工业PC计算出的6个关节电机的位置，通过ISA总线发送到PMAC多轴运动控制器。

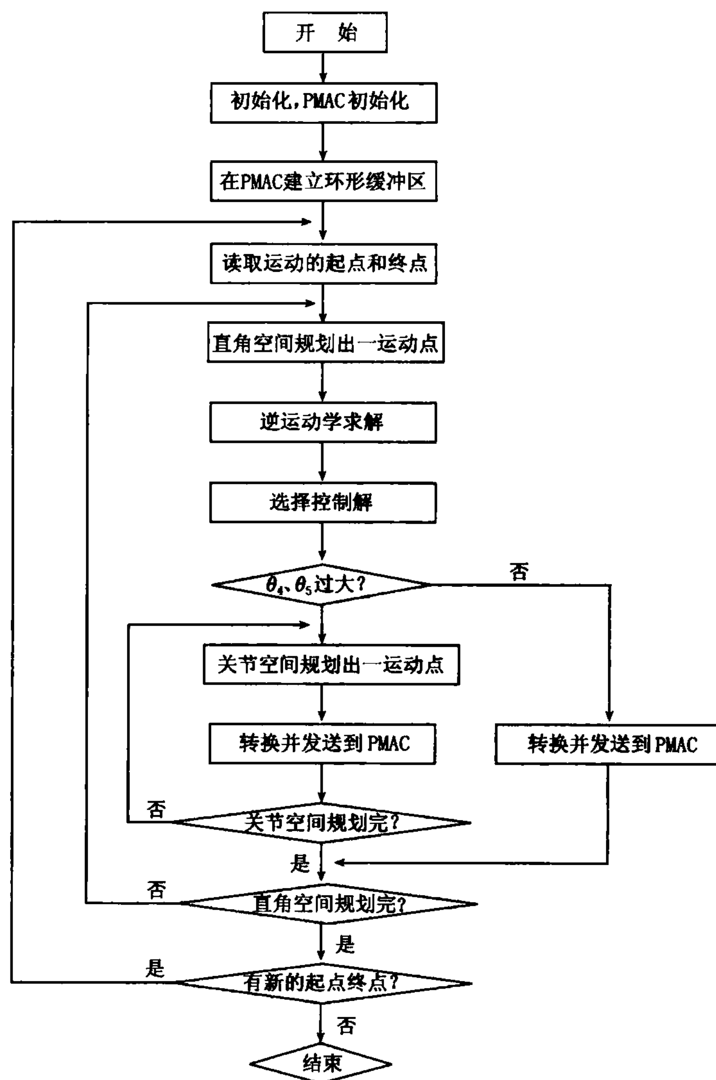


图3 工业PC程序控制框图

在工业PC和PMAC中分别建立一个通讯缓冲区，设立写缓冲区指针和读缓冲区指针，见图4。6个关节的关节电机位置构成一条记录，工业PC每产生1条记录，将其写入通讯缓冲区，同时写缓冲区指针加1。当工业PC检查到PMAC具备接收数据的条件时，从工业PC的通讯缓冲区中读取一条记录，发送到PMAC的通讯缓冲区，同时读缓冲区指针加1。当写缓冲区指针小于读缓冲区指针，且二者之差为1时，说明通讯缓冲区已存满未发送的记录，工业PC暂停计算新的关节电机位置，等待发送通讯缓冲区中的记录。如果PMAC通讯缓冲区中已存满未执行的记录，则向工业PC返回不具备接收数据条件的信息。

利用工业PC和PMAC的通讯环形缓冲区，保证了工业PC产生的关节电机位置数据

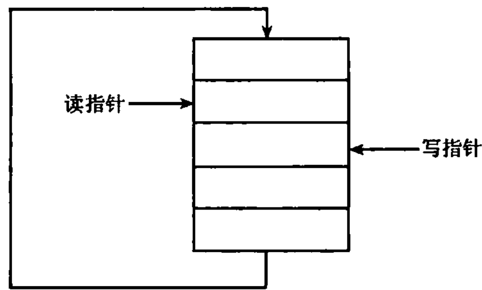


图 4　通讯环形缓冲区

能够安全、及时地发送到 PMAC,有效地消除了数据断档与数据覆盖现象。

五、实验结果

PMAC 多轴运动控制器设置为:三次样条插值,65ms 执行一条记录。我们对 A、B 两点间的直线运动进行了实验,其中 A 点为奇异位姿。

$$A=\begin{bmatrix}0&0&1&1070\\0&-1&0&0\\1&0&0&1300\\0&0&0&1\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}0&0&1&1270\\0&-1&0&200\\1&0&0&1300\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

实验时,YASKAWA K10 机器人末端从起始位置 A 点直线运动到 B 点,再从 B 点直线运动到 A 点,运动过程中机器人末端姿态保持不变。实验表明,机器人运动快速、平稳,控制实时性强。图 5 为实验时采集到的关节 1～6 的关节角。图 5 中的三段曲线,第 1 段和第 2 段是从 A 点直线运动到 B 点时各关节的轨迹,第 1 段是因 θ_4、θ_6 变化较大,利用关节空间运动规划对其进行插补形成的;第 3 段是从 B 点直线运动到 A 点时各关节的轨迹。图 5 中,横坐标为数据采样次数,两次采样之间的时间间隔为 65ms;纵坐标为角度值,单位为弧度。从图 5 可发现各关节的运动轨迹平滑。

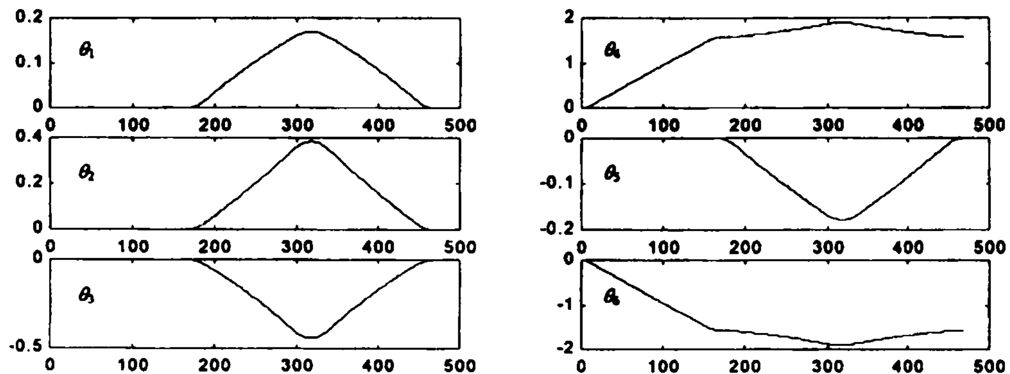


图 5　直线运动实验时各关节的运动轨迹

六、结束语

(1)本文给出的逆运动学求解方法,简单明了,计算量小,对末端工具无特殊要求。利用该方法不仅能够求出非奇异位姿的全部解,而且对于奇异位姿也能获得正确解。该方法可以很容易地推广到PUMA等六自由度工业机器人的逆运动学求解。本文给出的控制解选取和运动规划方法,简单有效。

(2) 构成的实时控制系统,运行可靠,实时性强,开放性好。实验中,机器人运动平稳快速,证明了本文算法与实时控制系统的有效性。

参考文献

1 *Paul R P, Shimano B E, Mayer G. Kinematic Control Equations for Simple Manipulators. IEEE Trans SMC*, 1981,11(6):449~455

2 贺昱曜. PUMA560逆运动学方程的新解法. 机器人,1989, 10(3):19~26

3 金永南,王敏,黄心汉. 一种新的机械手运动方程求解方法. 机器人, 1994,(16)(5):269~274

4 王奇志, 徐心和, 尹朝万. PUMA机械手逆运动学方程新的推导方法及求解. 机器人,1998, 20(2):81~87

5 蔡自兴. 机器人学. 北京:清华大学出版社,2000

作者简介:徐德 1965年12月出生,博士,副教授。目前在中科院自动化所复杂系统工程学开放实验室从事博士后研究工作。研究领域为机器人控制、多值逻辑、风力发电等。

复杂未知环境下多移动机器人队形控制[1]

曹志强 王 硕 张 斌 谭 民

一、引　言

随着机器人应用领域的不断扩展,多机器人系统以其柔性、并行性、鲁棒性等单个机器人所无法比拟的优越性已引起普遍重视。在这些应用中,一些要求多个机器人在存在障碍物等限制的环境中无碰撞运动时保持一定的几何关系,这就产生了队形控制问题。作为多机器人系统协作、协调的典型问题之一,队形控制在军事侦察、安全巡逻、搜索、营救、未知世界的探索(空间、海洋)以及工农业生产等方面具有巨大的应用前景。队形控制的实现可以缩短任务的执行时间,提高系统的效率,有利于任务的顺利完成。目前队形控制的研究已经引起国内外学者的广泛兴趣。文献采用基于行为的控制方法,提出三种队形位置决定技术:unit - center - referenced, leader - referenced 和 neighbor - referenced 技术。其他队形实现(包括避障)方法包括施加位置和方向限制,局部知识与/或全局知识的结合,基于"动态协调者"的合作避碰策略与基于势场的避碰方法的结合等。

从多机器人系统的应用背景看,很多情况下机器人面临的是复杂、动态的非结构化环境。传统的基于环境模型的结构已不再适用于机器人个体控制。为了克服机器人对实际环境建模的困难,提高多机器人系统的鲁棒性和作业能力,机器人采用基于行为的反应式控制体系结构。该控制结构不需要建立环境模型,按照任务的要求把机器人的运动分解为一系列基本行为的集合。个体机器人的协作行动可不必经过复杂的推理,只需通过行为的响应即可实现控制,有利于任务的完成。对于基于行为的机器人控制系统来说,首先要根据任务和环境的要求选取合适的基本行为集合,然后选择恰当的行为综合机制进行决策来指导机器人的运动。目前行为综合机制有如下方式:一种集中于如何根据当前的状态选择合适的行为;另一种集中于如何将多种基本行为的输出集成为一个高级的行为策略,目前矢量合成法使用比较广泛。此外,还有其他方法如文献所述。矢量合成法中各行为的控制参数对于集成的结果是非常重要的,包括行为控制参数固定和根据环境实时进行自调节两种。本文主要集中于对可变控制参数的研究,针对各种行为设计了一系列控制参数的产生函数。这些函数依据环境条件的不同输出不同的行为控制参数,基于这些控制参数机器人实现了行为的有机合成,产生基于当前环境的运动方向和运动速度值,

[1] 国家自然科学基金资助项目(批准号:69975022)和"863"智能机器人主题资助项目(批准号:9935 - 02)。

从而有效地解决了该类方法难以配置控制参数的困难。

本文多机器人系统的任务是一队机器人尽可能保持最初的队形从起始位置运动到目标位置。在运动过程中,机器人要避免与未知环境中静态障碍以及机器人之间的碰撞,同时要解决可能发生的死锁。

二、基于行为的设计

本文采用 leader - referenced 策略来决定各个机器人在队形中的理想位置。为了更好地保持队形,考虑到环境的复杂性,每个机器人有两种状态:lead 和 follow 状态。处于 lead、follow 状态的机器人分别称为 leader 和 follower。对于整个系统而言,每一时刻只有一个机器人被选为 leader。最初开始运动时,leader 是随机选定的。在完成任务的动态过程中,如果某一 follower 的实时队形误差超过一定阈值(用 $e_{formation}$表示),它就向当前 leader 请求更换 leader;当前 leader 在获取并分析了所有机器人的情况后,从中选定一个最适合的机器人作为新的 leader 并通知其他机器人,而后所有机器人在新 leader 的带领下继续完成任务。这种动态更换 leader 的机制可以更好地保持队形,使系统更加灵活的适应环境的变化。

(一)基本行为

根据系统任务的要求,在选取和构造行为时,需要考虑如下问题:

· 个体成员如何获得有效的队形保持策略?

· 给定机器人初始的队形位置、目标位置和个体成员有效的队形保持策略后,在机器人运动过程中存在干扰的情况下,机器人如何与环境进行动态的交互?

机器人为完成任务所需的基本行为集合构造如下:

Behaviors = {move _ to _ goal, keep _ formation, avoid _ static _ obstacle, avoid _ robot, random}

上述 5 种行为的输出均为二维单位方向向量,依次描述如下:

(1)move _ to _ goal 行为

该行为输出使机器人朝目标运动的方向向量,用 $V_{move_to_goal}$表示。

$$V_{move_to_goal} = \frac{1}{\sqrt{(x_g - x_c)^2 + (y_g - y_c)^2}} \begin{bmatrix} x_g - x_c \\ y_g - y_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中,$(x_g, y_g)^T$ 是目标点位置坐标;$(x_c, y_c)^T$ 为机器人位置坐标。

(2)keep _ formation 行为

followers 首先获得 leader 发布的下一步位置坐标,然后根据最初几何队形中与 leader 的位置偏差各自计算出下步理想的运动位置。当 follower 当前位置不与理想队形位置重合时,该行为输出使机器人朝理想队形位置运动的方向向量 $V_{keep_formation}$,表示如下:

$$\mathrm{V}_{keep_formation} = \frac{1}{\sqrt{(x_{fg} - x_c)^2 + (y_{fg} - y_c)^2}} \begin{bmatrix} x_{fg} - x_c \\ x_{fg} - y_c \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，$(x_{fg}, y_{fg})^T$ 为理想队形位置坐标。

(3)avoid _ static _ obstacle 行为

当机器人检测到障碍物有可能阻碍其运动时，它要旋转一定的角度以避免与障碍物发生碰撞。相应的行为输出向量 $V_{\text{avoid_static_obstacle}}$描述如下：

$$V_{\text{avoid_static_obstacle}} = \begin{bmatrix} \cos(\pm(\theta+\alpha)) - \sin(\pm(\theta+\alpha)) \\ \sin(\pm(\theta+\alpha)) \cos(\pm(\theta+\alpha)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，$(x_d, y_d)^T$ 为机器人当前的运动方向；± 根据机器人运动方向与障碍物的相对关系确定；θ 是机器人当前运动方向与机器人和障碍物连线之间的角度，当机器人运动方向朝向障碍物内部时取正值；α 是角度裕量。

(4)avoid _ robot 行为

当其他机器人进入本机器人运动方向正向的传感范围内时，此行为输出一个向量使本机器人向右转 $\pi/4$ 角以避免相互碰撞，用 $V_{\text{avoid_robot}}$表示。

$$V_{\text{avoid_robot}} = \begin{bmatrix} \cos(-\frac{\pi}{4}) & -\sin(-\frac{\pi}{4}) \\ \sin(-\frac{\pi}{4}) & \cos(-\frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \tag{4}$$

(5)random 行为

当机器人绕行障碍物时，由于环境的复杂性，机器人系统有可能会因通道太窄等原因无法通过从而造成死锁，这会导致任务无法完成。此时应在机器人当前运动方向上添加随机扰动，通过运动方向的偏转使系统脱离死锁状态。该行为输出的方向向量 V_{random}表示如下：

$$V_{random} = \begin{bmatrix} \cos(-n\beta) & -\sin(-n\beta) \\ \sin(-n\beta) & \text{con}(-n\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$m = \text{int}\left(\frac{2\pi}{\beta}\right) \tag{6}$$

其中，β 是随机偏转的基准角度；m 为可供选择的随机方向个数；n 是 $0 \sim m-1$ 之间的随机整数。

(二)行为决策

对(一)部分中所给出的基本行为输出通过加权、求和并归一化处理即可得出机器人的运动方向，用 $V_{\text{direction}}$表示。

$$V_{\text{direction}} = \text{normalize}\left([f_1(\cdot) \quad f_2(\cdot) \quad f_3(\cdot) \quad f_4(\cdot) \quad f_5(\cdot)] \cdot \begin{bmatrix} V_{\text{move_to_goal}} \\ V_{\text{keep_formation}} \\ V_{\text{avoid_static_obstacle}} \\ V_{\text{avoid_robot}} \\ V_{\text{random}} \end{bmatrix} \right) \tag{7}$$

其中,normalize(·)是归一化函数;$f_1(\cdot)$,$f_2(\cdot)$,$f_3(\cdot)$,$f_4(\cdot)$,$f_5(\cdot)$是5个基本行为合成时所需控制参数的产生函数。由于 leader 不负责保持队形以及系统可根据队形误差更换 leader,因此有 $f_2(\cdot)=0$(机器人是 leader);$f_1(\cdot)=f_5(\cdot)=0$(机器人是 follower)。这5个产生函数按照实际环境条件的变化输出不同的行为控制参数,从而合成不同的运动方向矢量以适应环境。本文机器人各行为控制参数的产生函数采用分段函数的形式,具体定义如下:

a. 对于基本行为 move _ to _ goal:

$$f_1(d_1)=\begin{cases} a_1 & d_1 \notin [0, s_\max] \\ a_1 \cdot \dfrac{s_\max^2}{d_1^2} & d_1 \in (b_1, s_\max] \\ a_1 \cdot \dfrac{s_\max^2}{b_1^2} & d_1 \in (0, b_1] \end{cases} \tag{8}$$

其中 a_1、b_1 为上式中可调整的参数,b_1 与机器人运动的步长有关;d_1 是机器人当前位置与目标位置之间的距离;$s_\max$ 是机器人传感器的最大检测范围。当机器人离目标点较远时,move _ to _ goal 行为有一个固定的行为控制参数;当目标点进入机器人传感范围之内且机器人离目标点的距离大于 b_1 时,考虑到障碍物的存在,该行为的控制参数随着机器人到目标距离的减小而增大;当机器人距离目标点不超过距离 b_1 时,该行为的控制参数不再继续增加,变为定值。

b. 对于基本行为 keep-formation:

$$f_2(d_2)=\begin{cases} a_2 & d_2 \in (b_2, +\infty) \\ \dfrac{a_2}{b_2} \cdot d_2 & d_2 \in [0, b_2] \end{cases} \tag{9}$$

其中 a_2、b_2 为可调整的参数;d_2 是机器人当前位置与理想队形位置之间的距离。当机器人距离理想队形位置较远时,该行为具有一个固定的控制参数;否则,机器人越靠近理想队形位置,相应的行为控制参数越小。

c. 对于基本行为 avoid _ static _ obstacle 和 avoid _ robot:

$$f_i(d_i)|_{i=3,4}=\begin{cases} 0 & d_i \in \Phi \\ a_i \cdot \dfrac{s_\max^2}{(d_i - r)^2} & d_i \in (b_i, s_\max] \\ a_i \cdot \dfrac{s_\max^2}{(b_i - r)^2} & d_i \in (0, b_i] \end{cases} \tag{10}$$

其中 a_i、b_i 为上式中可调整的参数,b_i 与机器人的半径 r 有关;d_i 是机器人传感器检测到的物体(障碍物或者其他机器人)与其之间的距离;Φ 为空集。当机器人检测到障碍物或其他机器人时,它将随与障碍物或其他机器人之间距离的大小而调整其相应行为的控制参数;当机器人未探测到任何障碍物或其他机器人时,相应的行为控制参数值为零。

d. 对于基本行为 random:

$$f_5(s_1)=\begin{cases}0 & s_1\in(0,b_5)\\ a_5\cdot s_1^2 & s_1\in(0,b_5)\end{cases} \tag{11}$$

上式中，a_5、b_5 为可调整的参数；s_1 是机器人连续不能运动的步数。当机器人检测到 s_1 超过下限 b_5 时，该行为的控制参数值随着停止步数的增大而增大；否则，其值为零。

本文 leader 的理想运动步长是固定的，follower 的理想运动步长 *step*(·)是一变量，由下式确定。

$$step(d,\gamma)=\begin{cases}0 & \gamma\notin\left[0,\frac{\pi}{2}\right]\\ \min(d\ \cos(\gamma),step_max) & \gamma\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right]\end{cases} \tag{12}$$

其中，γ 是机器人运动方向 $V_{direction}$ 与理想队形方向 $V_{keep_formation}$ 之间的夹角；d 是机器人当前位置与理想队形位置之间的距离；*step* _ max 为机器人运动的最大步长。

在机器人获得行为合成后的运动方向和理想的运动步长后，根据传感器检测到的环境信息，机器人可以确定出在该运动方向上实际运动的步长，从而得到最终的运动决策。

三、仿　真

根据所要完成任务的要求以及环境的状况，我们设计了如下仿真。3 个机器人 R_1，R_2，R_3 保持三角形，分别从点 S_1，S_2，S_3 同时运动到 G_1，G_2，G_3。仿真 1 假定机器人能在任意两个障碍物之间运动；仿真 2 允许存在机器人不能通过的区域。基本仿真条件如下所述：

(1) 机器人可以精确定位且知道自己的目标位置。

(2) 机器人能区别其他机器人和每一个静态障碍。

(3) 环境对于机器人而言是未知的。

(4) 机器人之间存在通讯，可以进行位置信息及状态信息的交换。

在两个仿真中，机器人都是半径为 0.2 的圆。它们具有相同的传感范围，区域都是半径为 1.5 的圆。机器人正常运动步长是 0.3，最大步长是 0.6。R_1 最初被选作 leader。avoid _ static _ obstacle 行为中角度裕量 α 设为 $\pi/6$；random 行为中随机偏转的基准角度 β 为 $\pi/9$。另外，决定是否更换 leader 的队形误差下限 $e_{formation}$ 设为 0.6。机器人行为控制参数的产生函数中各参数取值见表 1。

表 1　机器人行为控制参数产生函数中的参数

	a_i	b_i
Move _ to _ goal	1.0	0.3
Keep _ formation	2.0	1.0
Avoid _ static _ obstacle	1.0	0.3
Avoid _ robot	1.0	0.3
Random	1.0	2

基于上面的参数设置,得到如下的仿真结果。仿真1中各机器人的运动轨迹如图1所示。图1表明了系统中各机器人遵循三角形几何约束同时到达目标而不与任何环境障碍或相互之间发生碰撞。图2绘制了仿真2中各机器人在系统死锁前的运动轨迹,系统摆脱死锁后各机器人的运动轨迹在图3中给出。从两图中可以看到,在机器人运动的开始阶段,其他机器人在最初选取的leaderR_1的带领下运动,直到R_1到达位置T(7.487046, 7.671205)而导致无法继续运动。经过几步之后,系统诊断为处于死锁状态。通过在R_1当前运动方向上加入随机扰动,系统摆脱了死锁,在R_1的带领下继续运动直到R_2的队形误差超过设定值。然后其他机器人在新leaderR_2的带领下继续运动,绕过障碍最终到达目标。多机器人系统队形控制任务顺利完成。

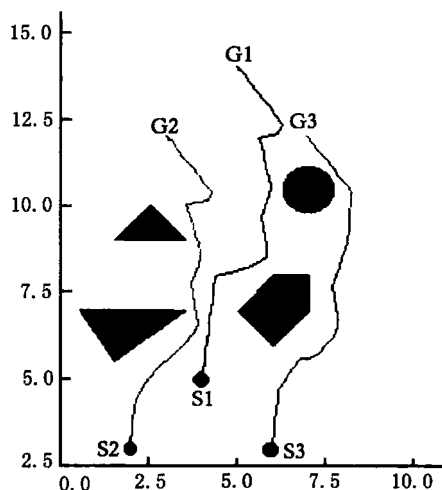


图1 仿真1中各机器人的运动轨迹

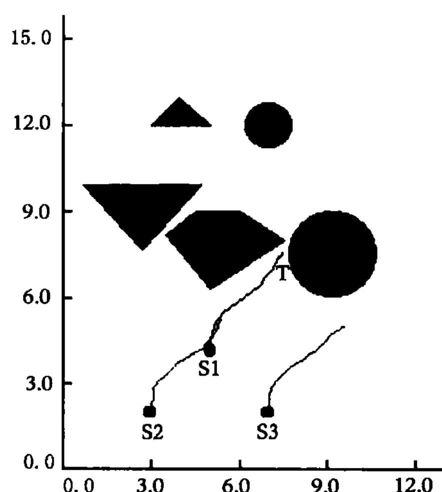


图2 仿真2中各机器人在系统死锁前的运动轨迹

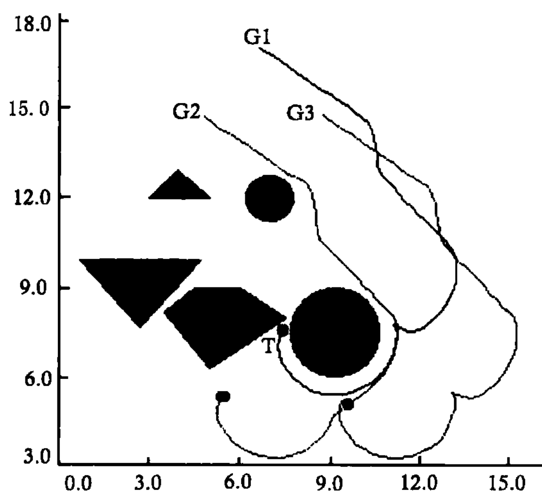


图3 仿真2中各机器人在系统摆脱死锁后的运动轨迹

四、结 论

本文针对现实世界复杂未知环境下多移动机器人队形控制任务,采用基于行为的方法实现,提出了五种行为。对于将这五种基本行为合成为一高级的运动策略,控制参数的选择是非常重要的问题。由于固定参数的行为合成策略缺乏鲁棒性,难以适应各种情况,因此本文设计了一系列行为控制参数的产生函数,依据环境条件的不同输出不同的行为控制参数用于行为合成,这样机器人就可以比较灵活地按照环境的变化调整自己的运动方向和运动速度值,完成给定的任务。仿真结果显示出该方法是可行的。为了使系统更加灵活地适应环境的变化,如何修正各行为控制参数的产生函数是需要进一步研究的问题。

参考文献

1 Cao Y, Fukunaga A S, Kahng A B. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. Autonomous Robots, 1997, 4(1): 7 ~ 27

2 谭民, 范永, 徐国华. 机器人群体协作与控制的研究. 机器人,2001, 23(2): 178 ~ 182

3 王越超, 谈大龙. 协作机器人学的研究现状与发展. 机器人, 1998, 20(1): 69 ~ 75

4 Balch T, Arkin R C. Behavior - based formation control for multirobot teams. IEEE Trans. Robot. Automat., 1998, 14(6): 926 ~ 939

5 Wang P K C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation. J. Robot. Syst., 1991, 8(2): 177 ~ 195

6 Chen Q, Luh J Y S. Coordination and control of a group of small mobile robots. In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., San Diego, CA, 1994: 2315 ~ 2320

7 Chen Q, Luh J Y S. Distributed motion coordination of multiple robots. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'94, Munich, Germany, 1994: 1493 ~ 1500

8 Parker L E. Designing control laws for cooperative agent teams. In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Atlanta, Georgia, 1993: 582 ~ 587

9 Parker L E. Alliance: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(2): 220 ~ 240

10 Fontán M S, Mataric M J. Territorial multi - robot task division. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(5): 815 ~ 822

11 Cai A H, Fukuda T, Arai F, Ueyama T, Sakai A. Hierarchical control architecture for cellular robotic system: simulations and experiments. In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Nagoya, Aichi, Japan, 1995: 1191 ~ 1196

12 J K Rosenblatt, C E Thorpe. Combining multiple goals in a behavior - based architecture. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'95, 136 ~ 141

作者简介:曹志强　生于 1974 年 9 月,中科院自动化所博士研究生。研究领域为多机器人系统。

单一输入规则群动态加权模糊推理模型

易 建 强

一、引 言

自从 Mamdani 将模糊推理应用到蒸汽发动机的控制以来，模糊理论得到了很大的发展，模糊控制已广泛地应用到各个领域。众所周知，传统的模糊推理模型通常是将所有的输入变量都置于每个 If – Then 模糊规则的条件部中。随着输入变量的个数增加，这种设定势必造成最大模糊规则数的指数倍增长，每个模糊规则的设定也变得越来越难。更重要的是，各个输入变量在模糊规则的条件部中都有相同的权值，在推理过程中不分轻重，因而不能忠实地反映系统要求。

尽管 Ichihashi 提出了多层模糊推理模型的概念，但尚无系统方法确定如何分层，且中间层的输入变量缺乏明确的含义。利用神经网络虽然能自动设定模糊规则，但必须先收集输入输出数据。Mizumoto 曾提出给模糊规则加权的方法，但这种方法只能区别各个规则而不能区别各个输入变量。

本文在单一输入规则群静态加权模糊推理模型的基础上，提出单一输入规则群动态加权模糊推理模型，并将此模型应用于倒立单摆的稳定控制上。通过计算机模拟，证明该模型的有效性及实用性。

二、单一输入规则群动态加权模糊推理模型

设有一系统，该系统有 n 个输入变量。设第 i 个输入变量为 x_i，系统输出变量为 f。对每个输入变量 x_i，定义一个单一输入规则群 SIRM – i 如下：

$$
\text{SIRM}-\text{i}:\quad
\begin{array}{l}
R_i^1:\ \text{if}\ x_i = A_i^1\ \text{then}\ f_i = C_i^1 \\
R_i^2:\ \text{if}\ x_i = A_i^2\ \text{then}\ f_i = C_i^2 \\
\qquad\vdots \\
R_i^{m_i}:\ \text{if}\ x_i = A_i^{m_i}\ \text{then}\ f_i = C_i^{m_i}
\end{array}
\qquad (1)
$$

由于有 n 个输入变量，如式(2)所示，对该系统可定义 n 个单一输入规则群。要注意在每个单一输入规则群 SIRM – i 中，只有输入变量 x_i 作为其条件部的唯一变量，而结论部变量 f_i 则是对应于系统输出 f 的中间变量。A_i^j 和 C_i^j 分别是第 i 个单一输入规则群 SIRM – i 中的条件部变量 x_i 及结论部变量 f_i 的隶属函数，可任意设定。m_i 则是输入变量 x_i 的划分级数。

$$\begin{gathered}\text{SIRM}-1:\{R_1^j:\text{if}x_1=A_1^j\text{then}f_1=C_1^j\}_{j=1}^{m_1}\\ \cdots\cdots\qquad\qquad\cdots\cdots\\ \text{SIRM}-\text{i}:\{R_i^j:\text{if}x_i=A_i^j\text{then}f_i=C_i^j\}_{j=1}^{m_i}\\ \cdots\cdots\qquad\qquad\cdots\cdots\\ \text{SIRM}-\text{n}:\{R_n^j:\text{if}x_n=A_n^j\text{then}f_n=C_n^j\}_{j=1}^{m_n}\end{gathered} \tag{2}$$

由式(1)可见,单一输入规则群 SIRM－i 只有 m_i 个模糊规则。因此,系统的所有的单一输入规则群的规则总数等于 $\sum_{i=1}^{n} m_i$。若按传统的方法将所有的输入变量都放入每个模糊规则的条件部,规则总数则变为 $\prod_{i=1}^{n} m_i$。当输入变量个数大于 2 时,在通常情况下后者的规则总数要比前者大。而且随着输入变量个数的增加,这个差距也越来越大。另外,由于设计单一输入规则群时只需考虑该输入变量与系统的关系,因此规则的设定变得很简单。

假设输入变量的观测值 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$已给定。由于每个规则的条件部只有一个变量,第 i 个单一输入规则群的第j 个规则的合成度则为$A_i^j(X_i)$。根据重心法及最小最大推理法,或乘积总和推理法,或简略化推理法等,便可由下式计算出第 i 个单一输入规则群的推理结果f_i。⊗表示规则的条件部与结论部的合成,通常取小或取代数乘。⊕表示所有规则的合成,通常取大或取和。

$$f_i=\frac{\int\left[\bigoplus_{j=1}^{m_i}(A_i^j(X_i)\otimes C_i^j)\right]\cdot f\cdot \mathrm{d}f}{\int\left[\bigoplus_{j=1}^{m_i}(A_i^j(X_i)\otimes C_i^j)\right]\cdot \mathrm{d}f} \tag{3}$$

在系统中,每个输入变量所起的作用往往都不一样。有的输入变量对系统的影响很大,而有的输入变量对系统的影响则比较小。例如,在倒立单摆的稳定控制中,单摆的角度及角速度的大小直接影响到控制的成功,而小车的位置及速度则是次要的。在单摆尚未平衡之前,要优先进行单摆的倒立控制。唯有将单摆基本上倒立以后,才能够开始小车的位置控制。因此,有必要给每个输入变量一个权值,而且权值应该随环境状况的变化而变化。

为此,单一输入规则群动态加权模糊推理模型还给每个输入变量即单一输入规则群定义一个动态重视度。第 i 个输入变量的动态重视度 w_i^D 定义如下:

$$w_i^D=w_i+B_i\cdot\Delta w_i \tag{4}$$

在式(3)中,w_i 是重视度的基本值,B_i 是重视度的变化幅度,Δw_i 则是重视度的动态变量。基本值和变化幅度是两个控制参数。动态变量则由模糊规则来确定,取值范围为[0.0,1.0]。基本值保证该输入变量在整个控制过程中所起的最小作用。由变化幅度和动态变量构成的动态值 $B_i\cdot\Delta w_i$ 则调节重视度的大小,使重视度实时反映控制状况的变化,从而实现系统的自适应控制。

在求得各个单一输入规则群的推理值及动态重视度之后,根据式(5)便可计算系统的

输出值 f。

$$f = \sum_{i=1}^{n} w_i^p \cdot f_i \tag{5}$$

如果重视度大，则对应的输入变量在式(5)中所占比例也大，结果对系统的影响也大。如重视度小，则对应的输入变量对系统的影响也小。因此，单一输入规则群动态加权模糊推理模型不仅可以减少规则数，减轻规则设定的难度，还可以通过动态重视度来调整各个输入变量在系统中的加权值，实现系统的自调节、自适应控制。

三、倒立单摆的稳定控制

本节以倒立单摆为例，对如何设计基于单一输入规则群动态加权模糊推理模型的控制器及其有效性进行说明。

如图 1 所示，倒立单摆由均质单摆、小车、直线轨道组成。不考虑各种摩擦，倒立单摆的数学模型如下：

$$\alpha = \frac{(m_c + m_p) g\sin\theta - \{F + m_p l_p \omega^2 \sin\theta\}\cos\theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p(\cos\theta)^2\} l_p} \tag{6}$$

$$a = \frac{4/3\{F + m_p l_p \omega^2 \sin\theta\} - m_p g\sin\theta\cos\theta}{\{4/3(m_c + m_p) - m_p(\cos\theta)^2\}} \tag{7}$$

$m_c, m_p, l_p, g = 9.8\text{m/s}^2$，分别是小车质量、单摆质量、单摆半长和重力加速度。θ, ω, α 表示单摆的角度、角速度及角加速度，顺时钟方向为正。x, v, a 表示小车的位置、速度及角速度，右边为正。F 为驱动力，朝右为正。

倒立单摆的稳定控制就是通过驱动小车，不仅要实现单摆的倒立平衡，而且还要将小车控制到轨道原点。设单摆的摆动范围为(－30.0°,30.0°)，小车的移动范围为(－2.4m, 2.4m)。再设四个状态变量 θ, ω, x, v 的正规化因子分别为 30.0°, 100.0°/s, 2.4m 及 1.0m/s。驱动力 F 的正规化因子为 $10(m_c + m_p)$。取正规化后的四个状态变量分别为模糊控制器的输入变量 x_1, x_2, x_3, x_4，正规化后的驱动力为模糊控制器的输出变量 f。因此，基于单一输入规则群动态加权模糊推理模型的控制器包括四个单一输入规则群和四个动态重视度。每个重视度有一个动态变量和两个控制参数。

根据经验我们知道，如果向某个方向推小车，车上的单摆将倒向相反侧。因此，每个输入变量的单一输入规则群都可由表 1 给定。NB、ZO、PB 分别表示在[－1.0,1.0]上均匀分布的负大、零、正大的三角形隶属函数。若单摆的角度为正大，产生的正驱动力将使小车向右移动，从而使单摆向倒立位置转动。若小车位于原点右侧，产生的正驱动力将使小车向右进一步远离原点，造成单摆转向左侧。然后通过控制单摆，间接地实现小车的位置控制。

表 1　单一输入规则群的设定

条件部变量 $x_i(i=1,2,3,4)$	结论部变量 $f_i(i=1,2,3,4)$
NB	-1.0
ZO	0.0
PB	1.0

当单摆的角度大时,必须先进行单摆的角度控制。只有当单摆接近平衡位置后,方可开始小车的位置控制。也就是说,单摆的角度控制是主要的,小车的位置控制是次要的。因此,对应于单摆的角度和角速度的动态变量 Δw_1 和 Δw_2 可由表 2 的模糊规则来确定,而对应于小车的位置和速度的动态变量 Δw_3 和 Δw_4 则可由表 3 的模糊规则来确定。这两个表的条件部变量均为单摆角度的绝对值。DS、DM、DB 分别是在[0.0,1.0]上均匀分布的表示小、中、大的三角形隶属函数。另外,表 4 给出了一组通过简单调试而得到的控制参数值。

表 2　单摆的动态变量的模糊规则设定

条件部变量 $\|x_1\|$	结论部变量 $\Delta w_i(i=1,2)$
DS	0.0
DM	0.5
DB	1.0

表 3　小车的动态变量的模糊规则设定

条件部变量 $\|x_1\|$	结论部变量 $\Delta w_i(i=3,4)$
DS	1.0
DM	0.5
DB	0.0

表 4　控制参数的设定

输入变量	基本值	变化幅度
单摆角度	2.00	2.50
单摆角速度	1.50	1.00
小车位置	0.15	0.20
小车速度	0.15	0.20

由表 2 至表 4 可知,如果单摆角度大,那么单摆的动态变量的推理值也大。加上单摆的控制参数大,在这种情况下单摆的动态重视度将远远超过小车的动态重视度,因而在系统中单摆的角度控制将发挥主要作用。当单摆接近平衡位置时,单摆动态变量的推理值变小,而小车动态变量的推理值变大。虽然小车的控制参数较小,但这时单摆的单一输入规则群的推理值也变小,所以小车在式(5)中的贡献相对变大,从而使小车的位置控制成

为可能。

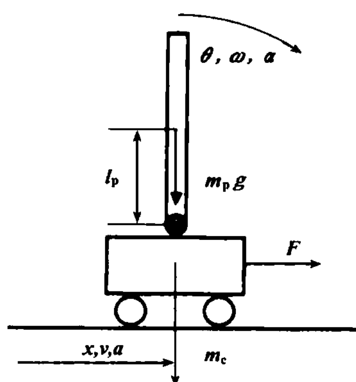
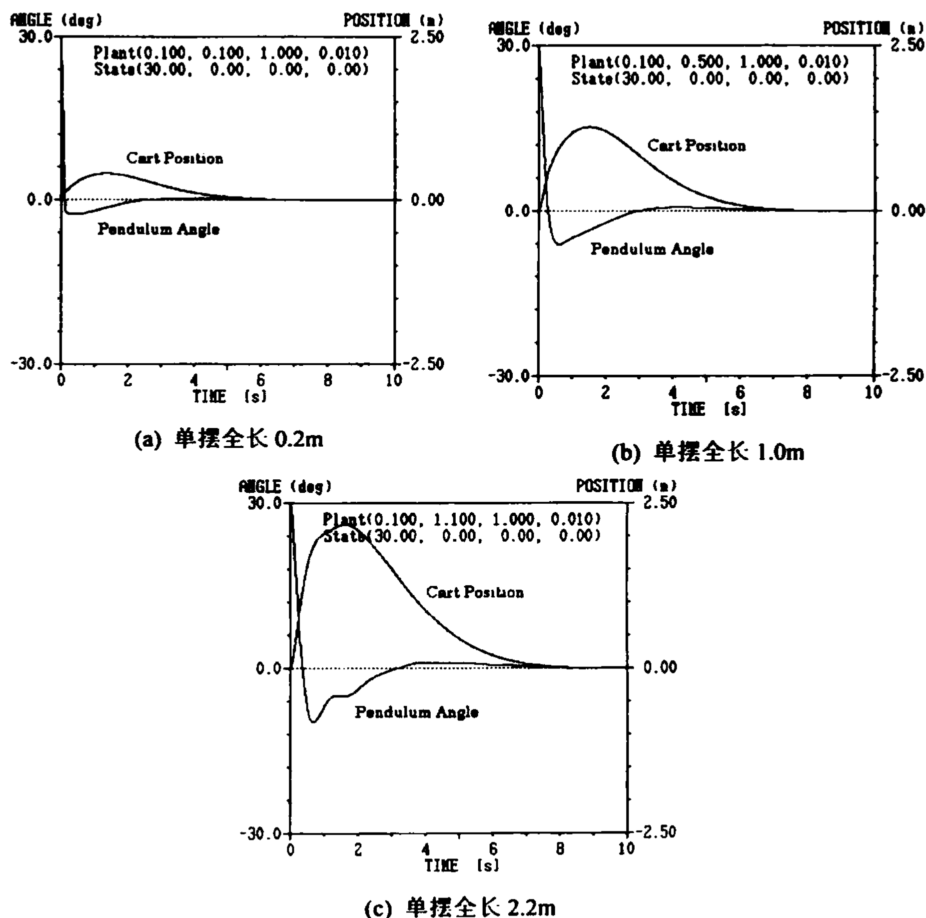


图1 倒立单摆模型

图2显示了三个计算机仿真结果。在这三个实验中,小车和单摆的质量分别固定为1.0kg和0.1kg。单摆的全长则分别是0.2m、1.0m及2.2m。单摆的初始角度是30.0°,而其他状态变量的初始值均为零。控制采样周期是0.01s。如图2所示,尽管单摆的长度不一样,设计的控制器均能在短时间内实现单摆的稳定控制,显示出该控制器具有很强的实用性和鲁棒性。由于不能很好地区别处理单摆的角度控制和小车的位置控制,基于传统模糊推理模型的倒立单摆控制器不仅需要大量的模糊规则,而且还需要比较长的时间才能实现稳定控制。



(a) 单摆全长0.2m

(b) 单摆全长1.0m

(c) 单摆全长2.2m

图2 稳定控制仿真结果

四、结 论

本文推出了单一输入规则群动态加权模糊推理模型。对多输入系统,该模型不仅能大量减少模糊规则数,使规则设定变得简单,而且能通过动态重视度来调节输入变量的权值,按系统要求区别对待各个输入变量,控制各个输入变量对系统的影响。计算机仿真结

果表明,基于该模型的控制器不仅结构简单,而且具有很强的实用性和鲁棒性。

参 考 文 献

1 Ichihashi H, Iterative Fuzzy Modeling and a Hierarchical Network, Proceedings of the 4th IFSA Congress, 1991, Vol. Engineering, 49 ~ 52

2 Kyung K H. Lee BH. Fuzzy Rule Base Derivation Using Neural Network – Based Fuzzy Logic Controller by Self – Learning, Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993: 435 ~ 440

3 Mamdani E H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, 121(12):1585 ~ 1588

4 Mizumoto M. Product – Sum – Gravity Method = Fuzzy Singleton – type Reasoning Method = Simplified Fuzzy Reasoning Method, Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996, 3: 2098 ~ 2102

5 Wang L., Mendel J M. Back – Propagation Fuzzy System as Nonlinear Dynamic System Identifiers, Proceedings of the IEEE International Congress on Fuzzy Systems, 1992. 1409 ~ 1415

6 Yubazaki N. Yi J., Hirota K. SIRMs (Single Input Rule Modules) Connected Fuzzy Inference Model, Journal of Advanced Computational Intelligence, 1997, 1(1):23 ~ 30

作者简介:易建强 1963年出生于江西萍乡。1981 ~ 1985年在北京工业学院(现北京理工大学)力学工程系学习,1986年公派到日本九州工业大学控制系留学,1989年硕士毕业,1992年博士毕业,工学博士。同年就职于东京CSD(Computer Software Development)公司,开发计算机辅助教学软件。1994年转到京都的Mycom公司,研究模糊控制理论及开发机电一体化产品。2000年底入选中国科学院"百人计划",2001年5月底回国,现在在中国科学院自动化所复杂系统实验室工作。研究员,博士生导师。已在各类学术刊物及学会上发表60余篇论文。研究方向包括模糊控制的理论和应用,人工神经网络,机电一体化,特种机器人等。

人类应当学会与地球表层协同进化

陈 颙 耿庆国

一

20世纪70年代以来，在钱学森院士等老一辈科学家的亲切关怀和指导下，我国一些中青年学者在天地生综合研究中进行了独创性努力，并取得了许多重要研究成果，如地外灾变因素在地质学中的体现、自然灾害的群发性、大旱对地震的影响与预报、天文因素对地震和气候变化的影响等等。此外，在运用我国古代的“有机论自然观”，也就是根据事物之间存在着有机联系的观点来对天地生进行综合研究和整理我国丰富、长期的自然灾变现象记录等方面，都取得了不少进展和成就。这些成果不仅有重要的理论意义，也具有为四个现代化建设服务的重要的实用价值。

自然科学发展史表明，从18、19世纪开始到20世纪上半叶，自然科学各学科的分科愈来愈细，但从20世纪70年代起已逐步开始了范围和规模愈来愈大、愈来愈广的综合研究，甚至进入与社会科学交叉研究的新阶段。这是由于客观事物之间本来就存在着广泛的联系，分支学科所研究的一些重要现象，常常不能仅凭本学科的规律加以解释，而是由相邻学科的、或更高层次的规律所决定的。一些自然科学工作者，囿于过去长期从事较窄的本门学科研究，导致他们的思维方式比较单一，因而往往不容易跳出本门学科的范围，去找出一些与其他学科有关的新的规律来解释复杂的自然现象。因此，系统科学的综合研究是自然科学发展的必然趋势，也是自然科学向更高层次成熟发展的标志。

1986年11月，时任中国科协主席的钱老，代表中国科协祝贺第二届全国天地生相互关系学术讨论会成功召开，并在讲话中，郑重提出了《发展地理科学的建议》。钱老指出：天地生综合研究要进一步向前发展，成为现代化了的地理科学。这是一个重要的问题，它的基础理论学科就是“地球表层学”。钱老强调：现在大家可以统一成这样一个意见，就是一定要进行综合研究，单独的研究是要不得的。“分割开来研究是不能解决问题的，只能是越搞越乱。因此，一定要进行综合研究”。

钱老指出：“地理科学”是包括内容很多的一大门科学。根据现代科学近一百年来的发展，可将它分成三个层次：最理论性的层次，就是基础理论科学，这就是“地球表层学”，尚待建立；第二个层次，就是应用理论学科，这发展得较快，有的还需建立，像数量地理学；第三层次，直接用于改造客观世界的应用技术，现在已经很多。能否这样考虑，首先要把“地理科学”树立起来，这是当今科学的一个重要组成部分，它又分为基础理论、应用理论

和应用技术。

“地球表层”这一概念,指的是和人有最直接关系的那部分地球环境,具体地讲,上至同温层的底部,下到岩石圈的上部,指陆地往下5~6km,海洋往下约4km。地球表层与人的生存、社会的发展都有密切的关系。地球表层往外的部分和地球表层更深的部分是地球表层的环境。

这里提出的“环境”概念,是系统科学的一个概念。“地球表层”是一个系统,而且是一个非常复杂的系统。在系统科学中,称非常复杂的系统为“巨系统”,不是大系统,而是比大系统还要大。地球表层是一个巨系统,这个巨系统不是封闭的,与环境是有交换的,这是当今系统科学中的一个概念。交换的外围就是巨系统的环境。地球表层这一巨系统与环境有物质和能量的交换,这是一个开放系统,其复杂性就在于它是个开放的系统,不是封闭的系统。封闭系统比较简单,开放系统要比封闭系统复杂。所以,我们要研究的对象就是这个巨系统的本身,要研究巨系统的本身,就必须考虑巨系统的环境。

钱老语重心长地告诫我们:人要有创造性,最高的创造性,要有真正的智慧,必须要有马克思主义哲学。道理很简单,因为这是人类知识最高的、最正确的概括,你掌握了这个锐利工具,当然会站得高、看得远。

如何建立地球表层学这门科学?钱老提出:要建立地球表层学这门理论科学,我们一定要运用系统科学的理论。系统科学也分为三个层次。系统科学也是从实践的需要发展起来的,所以它那直接改造客观世界的部分,即系统工程,发展最快;系统工程的理论,即应用理论,发展也比较快,诸如运筹学、信息论、控制论、大系统理论等;在这些系统科学基础上再概括,真正建立系统科学的基础理论——系统科学,现在正在努力。

钱老反复强调,地球表层学这门学问要用系统科学的一些成果,要用系统科学的方法来建立这门基础科学。钱老勉励我们:“大家如果能将天地生的研究与系统学的研究两者结合起来,我觉得那将是件了不起的事情。我们就是要建立起和人类、社会的发展有密切关系的‘地理科学’的基础理论——地球表层学。”

钱学森院士倡议创立地球表层学,作为一门新兴的理论科学,决不是简单重复地理学的研究对象,而是在更高层次上的概括和综合。它不仅为传统地理科学提供崭新的基础理论,而且要正确处理好天—地—生—人关系,深刻揭示地球表层巨系统运动规律,并找出使地球表层环境改善与进化的理论依据。

地球表层学担负着使地理科学真正成为一门交叉科学的任务。地球表层学的交叉科学性质是由地球表层巨系统性质决定的。地球表层巨系统包括了非生物、生物和人,包括了人类社会和自然环境。地球巨系统本身可分解为地球内部巨系统与地球表层巨系统这两个分系统。地球内部巨系统是由地球“内圈”(以固体地球为主)的地核、地幔、地壳构成的地球深部物质体;地球表层巨系统是由地球“外圈”的岩石——土壤圈、水圈、大气圈、生物圈、人类圈构成的地表自然与社会综合体。

地球表层学运用系统科学理论,阐明了地球表层的演化特征。地球表层是一个开放

的复杂有序的巨系统。输入地球表层的太阳辐射形成负熵流,抵消了巨系统不可避免的熵产生,从而降低系统的总熵,使它在远离平衡态的情况下产生有序稳定的结构——耗散结构。地球表层的发展是从简单到复杂,从无序到有序,从无机到有机的进化过程,也是地球表层三大类型耗散结构——自然地理系统、生态系统和人类生态系统发展演变的过程。贯穿地球表层演化过程的是负熵流的增强,太阳能的积聚,总熵的降低,最终形成高度复杂有序的包括非生物、生物和人的巨系统。而自组织、发展进化构成了地球表层巨系统的本质属性。

一个不争的事实是:地球表层系统是一个具有复杂"耗散结构"、充满活力的非平衡态的开放系统;系统内部各子系统之间,以及系统整体与地内、地外环境之间,存在着非线性的相互作用,呈现出广泛的协同效应与相干效应。地球表层中的自相似现象是无处不在的,无论是大气圈、水圈、岩石圈还是生物圈,无论是自然地理系统、生态系统还是人类生态系统,都可以发现许许多多的自相似现象。研究表明,自相似的分形结构在地球表层中是普遍存在的,是普适的。

地球表层系统由无序向有序、由混沌向自组织、由非生命向生命转化,导致了地球表层系统演化的复杂性和多样性。系统内外的协同效应,从微观机制上揭示了地球表层系统进化的自组织能力,以及实现其结构稳定性,进化有序性和功能最优化的内在动力源泉。

由巨大天文事件、地质事件导致的地球表层物态突变、环境突变、气候突变和生态突变,以及人类社会形态的变革和盛衰等,构成了一系列长周期和随机的"巨涨落"现象。地球表层系统非平衡态中的巨涨落是维系与发展其耗散结构的驱动力,促使系统由原先的不稳定态跃迁为新的稳定有序态。

地球表层资源耗竭与生态环境恶化的根本原因,是人类从地球表层中获取大量低熵物质,又将高熵物质归还给生态环境,引起生态环境的熵增。人类必须认识到,社会经济的发展最终要受到地球表层的遏制。人类无限制的发展,只能带来灾难;人类社会只有与地球表层及其环境相协调,才能可持续发展。人类应当学会与地球表层协同进化。必须按照地球表层的规律,改革人类社会。必须按照地球表层能量流通与物质循环的规律,改造和设计生产体系。必须按照地球表层空间有序结构的规律,进行自然经济的区划与规划,实现最佳地域组合。地球表层学会在区域开发、国土整治、生产力配置、城市规划和国民经济建设中发挥了重要作用。

总之,地球表层巨系统是一个统一的自然社会综合体,实质上是地球表层物质系统(岩石圈、水圈、生物圈、大气圈构成的自然实体)与人类社会系统(社会实体)相互联系、相互作用的复合系统。诸种天文因素、地质因素、生物因素、特别是人为因素共同作用于地球表层,使地球表层变成了天—地—生—人之间、地球巨系统各圈层之间矛盾运动激化的焦点。地球内外物质的机械(力学)运动、物理运动、化学运动、生物运动、地质运动、人类活动(社会运动)等诸种运动形式在地球表层产生综合效应,构成了地球表层系统状态随

时间变化的动态性特征。地球表层巨系统的结构和功能是天、地、生、人关系的集中体现。而人类社会与地球表层自然界的同步协调发展,是自然发展规律、科学技术规律和社会经济规律的客观要求,也是地球表层巨系统根治“自然社会综合症”整体防治“自然社会灾害链”的必由之路。

二

钱老于1998年8月1日指出:“人类在20世纪创造了巨大的科技成就。这些成就深刻地改变了人类生产和生活的方式和质量,同时也深刻地改变了人类的思维观念和对世界的认识,极大地推动了社会的发展。把这些辉煌的科技成就用科普的形式表现出来,介绍给社会大众,这对于普及科学知识、增强科技意识、提高民族的科学文化素质具有重要意义。”

《科学的丰碑——20世纪重大科技成就纵览》一书由近300篇科普作品组成,深入浅出地介绍了人类在20世纪创造的重大科技成就,既有重要科学理论和重大科学发现,又有重大发明创造和重大技术突破;既反映了对推动科技进步具有重要意义的科技成就,又介绍了对改变人类生活方式、提高人类生存质量产生重大影响的科技成果,如相对论、量子力学、宇宙起源、混沌与分形、系统科学、基本粒子、DNA双螺旋结构、大陆漂移和板块结构、计算机、人工智能、无人工厂、设施农业、克隆技术、基因工程、集成电路、激光技术、核能作用、人造卫星、空间站、高速列车、摩天大厦等等。内容基本涵盖了科学技术各主要领域的主要方面。出书前,有关方面组织了300多位科学家,对20世纪各有关领域的科技成就进行了反复论证,最终筛选出近300项能反映科学技术发展面貌和对推动社会进步具有重大影响的、具有里程碑意义的科技成就,分门别类地加以介绍。许多著名科学家参加了论证工作,钱老对本书内容的安排作了非常重要和十分具体的指导。

钱老在肯定“这本书的内容是很不错的”同时,还切中要害地指出:“宣传科普,使广大人民群众理解近代科技成就,是现代化建设的一个重要方面;但还有一面也非常重要,即近代科学技术不足之处,或者说还需要努力解决的问题,如环境污染、水资源合理利用问题、城市垃圾问题、自然灾害预报问题等,希望引起重视。既了解科技成就,又知道还有待解决的问题,这样更全面一些,这也是我们科普工作的一个重要任务。”

在钱老担任中国科协主席期间,由翁文波院士领衔于1992年建立了中国地球物理学会天灾预测专业委员会;近10年来联系和团结了我国从事天地生综合研究和自然灾害综合预测研究的科学家,踏踏实实地开展了多因素、多灾种综合预测重大自然灾害的艰苦探索。在1992~2000年正式上报中国科协的每年度中国天灾综合预测意见中,业已取得了较好的预测效果,如1994年的黄河水情,1995年陕甘宁大旱,1996年包头6.4级地震和南黄海6.1级地震,1997年西藏玛尼7.5级地震,1998年张北6.2级地震,1998年长江大水,1999年台湾南投7.4级地震,2001年北方大旱等,在一年时间尺度内预测得较好。在1997

年4月新疆伽师强震的临震预测上,也取得了成功尝试。

举世公认,重大自然灾害的预测、预报、预防,是当前高科技的世界性前沿课题。自然灾害预测应当包括五要素,即对自然灾害发生的时间、地点、强度、人员伤亡和经济损失提出预测,而其核心问题在于准确预测自然灾害发生的时间、地点、强度,这是关键的关键。此外,我们还应对自然灾害造成的危害进行预测,包括对建筑工程的损害预测、对次生灾害的预测、对人员伤亡和对社会经济影响的预测,以便为政府发布天灾预报和实施天灾预防提供科学依据,当好科技参谋。

我国学者一致肯定了特大自然灾害现象存在群发性,即地球的大气圈、岩石圈、水圈和生物圈在某一时期确实存在各种自然灾害集中出现的现象。大旱、强震、洪水、泥石流、滑坡、风暴潮在同一时期相继频繁出现的事实,表明自然灾害和变异的出现是“祸不单行”的。

我国从事自然灾害综合预测研究的学者,愈来愈一致地认识到:各种自然灾害的发生并非彼此孤立,而是存在着地下、地表、地上的灾害链效应。研究地球各圈层之间的相互关系,特别是研究陆圈与气圈之间的交互作用和地气耦合机制,是研究自然灾害预测预报的重要生长点,也是地球科学的新的重要领域。30年来,我国学者所从事的地球各圈层的交叉学科研究,已取得了令人欣慰的进展。揭示了自然灾害具有明显的非线性、开放性、群发性、并发性的特征。只有开展多科学交叉的高层次研究和多因子的综合研究,切实做好各灾种、各手段的联合攻关,才是提高自然灾害预测水平和提高人们对自然灾害规律及成因认识能力的有效途径。

钱老一向十分关注“自然灾害预报问题”。他特别指出一些与地球表层学研究领域有关的问题,正是“近代科学技术不足之处,或者说还需要努力解决的问题,如环境污染、水资源合理利用问题、城市垃圾问题、自然灾害预报问题等,希望引起重视。”

我们非常赞同钱老的远见卓识。在此,我们要特别强调:为贯彻科教兴国战略和可持续发展战略,必须对国家21世纪,首先是对2002~2010年期间,可能遇到的特大自然灾害(巨灾),事先做好综合预测、预报、预防和抗灾工作,这是一项十分重大而紧迫的科研任务,是对国计民生、社会稳定、经济发展、国家繁荣至关重要的基础性、前瞻性研究项目。

所谓巨灾,系指对整个国计民生产生重大社会和经济影响,足以造成部分省市社会经济生活暂时停顿,需要由中央和国务院直接动员和组织全国国力,统筹进行防灾、抗灾、救灾的自然灾害。这些巨灾包括:发生在超过100万人口大城市附近的7.5级以上强震;黄河、长江、淮河、珠江、海河、辽河、松花江百年不遇的特大洪水;我国产粮区百年不遇的大面积严重干旱;死亡在1万人以上;直接经济损失在800亿元人民币以上;总受灾人口在1 000万人以上的自然灾害。“凡事预则立,不预则废”。居安必须思危,有备才能无患。知患则能防患,患来免于茫然。责任重于泰山,要防患于未然。减轻巨灾损失,确实是关系社会可持续发展和治国安邦大局的首项战略任务。

考虑到当代科技发展的总趋势,国家应当把鼓励创新,提倡交叉科学和整体性研究,

作为发展我国科学技术尤其是基础研究的一项重要战略决策。

实践表明，包括减轻自然灾害预测预防研究在内的基础研究，具有鲜明的超前性、突破途径的非常规性和某些重大发现的偶然性以及科学创新的艰难性。科学技术发展规律表明，许多重大发现往往是由少数人首先提出的，有些还是偶然发现的。中国人特有的注重整体性、综合性和复杂性的思维特征，是与当代科技发展的总趋势相符合的。我们应当充分发扬我国传统的整体观方法论，并和现代高科技紧密结合，为21世纪中国科技的新崛起和争取更大的减灾实效努力奋斗。国家应当认真扶植新兴交叉学科，切实加强自然灾害综合预测预防研究。国家重大基础研究，应当优先考虑有希望的新构思和新兴交叉学科领域项目。要贯彻双百方针，保护少数，对非常规学术途径的探索研究予以一定的经费支持。建议设立新构思、新交叉、新领域科学基金和中国天灾预测与减灾公益基金。动员社会力量来认真资助天灾综合预测和减灾对策研究这一公益事业。

我们人类赖以生息和繁衍的地球是非常复杂的巨系统，其复杂性表现为：地球系统的开放性、时空结构的多层次性、不稳定性、不平衡性、不均一性，相互作用的多因素和多样性，以及系统、子系统的整体行为和演化的非线性和不可逆性。

我们确信：开展钱老所支持的多学科交叉的天地生综合研究，开展钱老所倡导的地球表层学研究，必将推进深刻而整体性地认识我们的地球，使21世纪的人类真正学会与地球表层协同进化；使地球科学真正成为能够预测和减轻自然灾害、预测和开拓自然资源、预测和改善自然环境、正确处理人与自然的关系，从而确保国泰民安和促进社会经济的可持续发展；确保中华民族在21世纪的伟大复兴。

参考文献

1 钱学森．发展地理科学的建议．大自然探索．1987(1)：15

2 钱学森．关于地学的发展问题．见：中国科学院第二届地学部大会会议论文集．北京：科学出版社，1998．11～15

作者简介：陈颙　中国科学院院士、中国地球物理学会副理事长、中国地震局研究员。

耿庆国　中国地球物理学会天灾预测专业委员会副主任、中国地震局研究员。

钱学森与地理科学

马蔼乃

钱学森院士主编出版过一本《论地理科学》,他的地理科学思想是非常清晰的,知识渊博,逻辑严密。钱学森院士在许多科学领域都有独到的见解,他在地理科学领域中的高屋建瓴、高瞻远瞩也是惊人的。由于我们的研究能够证实他对地理科学许多思想论述的正确性,反过来他的地理科学思想对我们的研究也是一种肯定。我们相信,追求真理,只要研究的思想方法是正确的,那么一定会殊途同归,无论是谁来研究,结论应该是相同的。下面是根据我们对地理科学研究的心得,浅谈对钱学森院士地理科学思想的认识。

一、钱学森提出地理科学

1987年,钱学森发表了《发展地理科学的建议》,正式提出了地理科学的概念。地理学界许多人都不能理解为什么一个"两弹一星"的火箭专家提出发展地理科学?实际上钱学森不只是一位杰出的科学家,而且是一位战略科学家、哲学家。在马克思主义思想指导下的中国科学家,我们再也不应该是一个伟大的科学家,却是一个渺小的哲学家了。一个科学家只有在一个领域中深入到底(所谓"底",我认为是在一定的历史阶段科学研究的相对极限),然后再返回上来,越是钻研得深,越是反弹得高,只有这样才能既是科学家又是哲学家。这样的科学家不是一般的专家,而是战略科学家。一般而言,科学家很少能够深入到底的,往往用一辈子的时间,虽然到达了某些前沿,但却没有时间去拓宽了。或者深入不到底,急于反弹,结果高度有限,往往是虽然涉及科学领域的面很宽,但是比较肤浅。这好比一棵大树,根越深,树越高;根系分布越宽广,树冠覆盖越茂密。钱学森正好比是一棵大树,他在力学领域内,是钻研极深的科学家,他能够用微观物理学来解释宏观力学现象(20世纪50年代他研究了物理力学)。钱学森在思维逻辑上,得益于数学与力学严谨的有序化,奠定了一个极好的智慧脑基础,这好比是他的"根很深",达到了现代科学的最前沿。后来又在航天技术、控制论、系统科学等方面作了突出的贡献,这好比是他的"根系很宽广"。20世纪70年代以来,进而对哲学、地理科学、建筑科学、军事科学、思维科学、人体科学、行为科学、社会科学、科学与文艺等进行论述,这好比是他的"树冠很茂密"。最后提出大成智慧,这好比是他的"树干既粗又高"。他从整个人类认识世界的历程上来研究科学的体系,现今提出了11个研究部门,地理科学是其中之一。又从开放的复杂巨系统的研究中提出五大系统,地理系统又是其中之一。在社会主义建设的系统结构中的四大建设,地理建设又是其中之一。钱学森是居高临下,从整个科学体系中提出介于自然科学与社

会科学之间的“桥梁科学”——地理科学的，钱学森把古老的地理学提升到为国民经济主战场服务的地理科学，其目的也很明确，是为了可操作的可持续发展战略目标。

20世纪下半叶是地理学向地理科学飞速发展的半个世纪。本来地理学是介于文理科之间的科学，但是大学所属地理系长期归属于文学院，直到今天，在西方国家，地理系仍然属于文学院。按照康德的观点，地理是研究空间的科学，历史是研究时间的科学，新中国成立前中国大学中的地理与历史同属于史地系。1949年以后，受到前苏联的科学体系的影响，地理学归入理学院。地理学的研究以描述性、思辨性定性方法为主，也伴随着一些定量的计算。半个世纪以来，地理学发展成为地理科学的历程是很清楚的。地球经历了天文期、地文期、生文期、人文期，地理学是人文期人类社会与地理环境关系的一门学科。因此地理学的时空限域分古地理学（自有人类以来200万年到有历史记载5 000～6 000年），人类在地球陆地表面零星分布，人类作用的垂直距离为±10m；历史地理学（有历史记载以来到人类越出大气圈，进行航天飞行），人类几乎分布到全球陆地表面，人类作用的垂直距离为±10km；现代地理科学（1957年以来），人类越出了大气圈，开始航天与航宇。20世纪30～40年代，大学中设史地系，地理属文科性质，研究人类赖以生活与生产的地理环境，简称人地关系；40～50年代生态学发展，生物学家以有生命的物体为主体，研究生物与非生物的关系，简称“生地关系”，有生命的物体中包括了人类，因此生态科学认为包括了地理学；60～70年代人类社会高度的经济发展，尤其是工业化的后果，产生的污染排泄物，污染空气、污染水质、污染土壤、污染动植物，人类在食用动植物时，食物链上积累的污染物反及人类自身，物理学家、化学家与部分地理学家纷纷加入对环境污染的研究，环境科学的发展从小环境污染发展到社会与自然环境和人工环境（大环境）的研究，即研究人类社会与环境的关系，姑且简称“社地关系”；80～90年代航天技术大发展，遥感、遥测、全球定位系统、卫星通讯，计算机学家、航天科学家与部分地理学家结合研究天（航天）、地、人、机（计算机）关系，钱学森作为航天科学家，看到了国民经济主战场的问题，提出研究地球表层理论的地理科学是可以理解的。但是钱学森确实不是地理学家，他的地理科学思想不可能在具体的学科门类上完全正确，这同样是可以理解的。能够从科学分类的整体上提出地理科学的正确思想，就十分的了不起！所以黄秉维院士把钱学森比为天地生科学上空的“苍鹰”，具有居高临下的指导才能，是有道理的。

钱学森对各门科学都分了研究的层次，从马克思主义哲学（性智、量智）；哲学与科学之间的桥梁，包括地理哲学；科学自身的基础理论、技术科学、应用技术；再到前科学（实践经验知识库和哲学思维，不成文的实践感受），包括地理经验与地理景观的感性认识，即地理的野外工作，对地理现象原型的认识，这是一个完整的体系。我们在研究地理科学时，实践证明了在地理科学自身层次上存在着基础理论的理论地理科学（即钱学森提出的地球表层科学包括自然环境与人工环境两部分）、技术科学的地理信息科学、工程技术的地理系统工程。理论地理科学是从圈层结构的进化到独立因子层的发展，与钱学森的地球表层科学十分相近，我们的研究要再向深层发展一些也更加具体一些。地理信息科学则

与钱学森的认识差别较大,我们把所有的遥感观测、卫星定位、虚拟实验、获取原始资料的方法作为地理科学的技术科学,并且用地理信息科学统一起来。而地理系统工程与钱学森的设想几乎没有差别,仅仅是多列一些门类或者是少列一些门类的区别。地理系统工程包括:资源管理、生态系统、环境工程、灾害监测、人口调控、城镇建设、基础设施、产业结构、区域开发等,两者都认为这是国民经济的主战场。

钱学森院士非常明确地区分了地理科学与地理学的区别,他认为原来的地理学受自然科学与社会科学的制约,划分成自然地理与经济地理,分别属于自然科学与社会科学,而地理科学是自然科学与社会科学的"桥梁科学",非简单性科学,而是复杂性科学。他还区分了地理科学与地球科学的界线,他认为地球科学包括地质科学、大气科学、海洋科学等,属于自然科学,地球属于星系系统。

二、钱学森认为地理系统是开放的复杂巨系统

钱学森认为人类的科学研究,说到底实际上是五个开放的复杂巨系统,即星系系统(物理)、地理系统(地理)、社会系统(事理)、人体系统(人理)、人脑系统(心理或脑理),这是高度的概括。钱学敏阐述了钱学森的地理系统与社会系统的关系。实际上地球上最高的系统是人地系统,人地系统中包括两个子系统,一个是社会系统,一个是地理系统。地理系统所包括的环境为自然环境(或称自然景观)与人工环境(或称人文景观)两部分。社会系统的环境就是地理系统,而地理科学是原来的地理学、生态学、环境学、航天信息学相融合的,并且是更加发展了的复杂性科学,属于在宏观层次(指渺观、微观、宏观、宇观、胀观中的宏观)上的复杂性科学。

钱学森在1983年提出地理科学的基础理论:地球表层学是开放的、有序的巨系统。因为地球表层的物质与能量有太阳辐射能量的输入,有地球内部质量与能量的输入,同时也有输出,而输入与输出是一个具有耗散结构的开放系统;由于地球表层能量流是负熵流,所以又是进化的,地球从天文期、地文期、生文期,进化到人文期,是有序的;有序巨系统还表现在多层结构方面,钱学森认为分四个层次,即基层是一个工厂、企业,一个生活区,一片林地,一块农业种植田,一片渔业水面等,实际上就是土地利用类型;上一个层次是地区环境,实际上就是类型区域;更上一个层次是国家层次;最后是世界层次,即全球的变化问题。1984年钱学森进一步提出生态经济学必须关心长远的环境问题和资源永续,再次强调地球表层学的系统性。我们在《长江地区可持续发展丛书》中研究可持续发展就是从全球到国家,再到长江地区的,分层次研究。钱学森在1989年再次提出了地理科学系统是开放的复杂巨系统,把星系系统、地理系统、社会系统、人体系统、人脑系统都看成是开放的复杂巨系统,这是钱学森的发明,也是中国人的发明。西方国家,以美国为代表的桑塔非研究所,研究复杂性科学是有贡献的,他们研究的是混沌与有序之间的现象,他们在非方程表达的数学方面有创建。但是他们不具备辩证思维,他们基本上还是还原论的思想方

法。而钱学森研究的开放的复杂巨系统及其方法论,所表达的辩证思想,其深度与广度都是西方科学家所望尘莫及的。中国科学家具有古代朴素辩证法的"基因",又有现代辩证唯物主义教育的基础,是得天独厚的。

我们的研究仅仅是在航天信息与地理信息一体化网络系统及其应用方面,从一个方面证实了钱学森的观念是正确的。该系统分四个层次,最底层是技术层,是由影像库、图形库、属性库、知识库、逻辑库等组成遥感信息系统与地理信息系统;技术层之上是专家层,由地理专家系统组成;专家层之上是管理层,由管理信息系统组成;最顶层是辅助决策层,由辅助决策系统组成,该系统属于开放复杂巨系统。钱学森提出的开放的复杂巨系统的研究需要用综合集成法,从定性到定量研究等学术观点。在我们的实践中,确实体会到了综合集成与定性到定量关系的重要性。所谓综合集成在航天信息与地理信息一体化网络系统中,遥感信息系统中的图像库与地理信息系统图形库之间的联系是用地理遥感信息模型解决的;地理信息系统属性库与地理专家系统知识库之间的联系是用地理信息编码模型解决的。无论是地理信息模型还是地理信息编码模型都是由定性到定量的结果。根据我们的研究,综合集成绝不是简单地将各个子系统用接口连接起来就可以完成的,而是需要有子系统之间的"桥梁"模型连接,才能构成完整的天地信息一体化网络系统。

三、钱学森询问地理科学里有没有相似理论

地理逻辑中除了应用演绎逻辑、归纳逻辑外,最多的是应用类比逻辑。但是长期以来地理学家们大多数是进行直观的类比、实验的类比、思辨的类比,没有建立像物理学中的相似理论。最近我们发展的非线性、地理复杂方程,除了把物理方程的演绎逻辑,随机方程的归纳逻辑融合外,还应用了类比的相似准则。

地理非线性是指所有自变量与因变量之间不是一次的函数关系,在地理信息模型中的复杂性主要是指确定性(数理方程)与不确定性(随机不确定、模糊不确定、灰色不确定、自组织自相似的不确定)辩证地统一在一个方程中的复杂性。类比的相似准则,是要拓宽厘米克秒制,从而建立广义地理相似准则。由于地理信息模型是图像与方程对应,抽象逻辑与形象逻辑对应,地理参数具有区域性、时序性。因此地理信息模型具有非线性、复杂性、相似性、区域性、时序性的特点。这与地理学中认为地理现象的特点是综合性、区域性来比较,地理科学把综合性具体化为非线性、复杂性、相似性,把区域性拓宽为区域性与时序性,并且从定性走向了定量,成为可计算的科学,成为可向前预报的、向回追溯的科学。

人类的现代科学史大约500年,而人类社会的历史大约5 000~6 000年,人类的历史大约200万年,地球的历史大约46亿年,我们怎么可能用一个一成不变的数学公式把规律框死呢?地理信息模型是一个可以从删节号中不断地提出新相似准则的方程,随着地理现象变化的周期,日变化必须每天计算,不断修整地理参数,年变化必须每年计算,不断修整地理参数,不断地提高准确度和精度。我们证明了地理非线性复杂方程是集演绎、归纳

与类比(相似理论)为一体的;确定性与不确定性(随机不确定性、灰色不确定性、模糊不确定性、自组织自相似不确定性)是辩证的;图像与数据是对应的,即抽象思维与形象思维对应的定量计算方法。这是西方科学还原论所不及的,只有具有辩证逻辑的东西方式结合的系统复杂论才能解决的。其中的形象思维不是低阶段的感性认识,而是在抽象思维基础上的形象思维,图像的计算。

因为撰写本文的需要,我翻阅了有关书籍,发现钱学森早在 1986 年 1 月 25 日给浦汉昕的信,在信的结尾提出:"地理学里已经有了'相似理论'了吗? '相似理论'有没有道理?"这的确令我震惊,兴奋不已。钱学森的地理科学思想与他的科学思想是一致的,真可谓一通百通,说明我们的研究早已在他的预料之中了。

四、钱学森论地理哲学

地理学家黄秉维院士在评论地球表层研究时,第一,肯定了地球表层不是一个面,而是一个层,该层是一个巨系统;第二,要用系统学和系统工程的方法来研究这个巨系统;第三,提出一些有重要意义的研究课题,为此黄秉维提出了华南坡地利用与改良、解决华北水源短缺和黄河隐患的途径,以及西北干旱区开发的三个问题。指出钱学森虽然"不是天、地、生的科学家,却是见闻甚广,博学多思的科学家。我觉得他有点像在天地生领域上回旋的苍鹰,具有搜索追击移动目标的本领,一发现目标,即疾下猎取。他不受天、地、生行业的束缚,看问题比我们株守于一个学科的人更敏锐、更准确。"黄秉维看到了钱学森具有居高临下的才能,什么是居高临下的视点呢? 实际上就是钱学森的哲学思想。钱学森的哲学观点是很深奥的,他继承了马克思主义的哲学观点和辩证的唯物主义。又在当代科学发展的系统论(开放的复杂巨系统)、信息论、控制论、耗散结构、协同理论、突变理论、复杂理论等的基础上,在当代高新技术航天技术、计算机技术等的基础上,在当代可持续发展理论、中国特色的社会主义理论等的实践基础上发展了马克思主义的哲学观念。因此他认为地理科学与马克思主义哲学之间有一门地理哲学,这门地理哲学的起点当然也是很高的。

地理学界长期以来是很重视哲学思想的,尤其是自然地理,以自然辩证法为指导,研究自然地理辩证法的历史。但是往往是由于地理现象太复杂,研究深入不下去,各个要素之间有联系,不能分割,用还原论的方法无法解决,因此又退回到哲学的层次,用辩证唯物主义哲学解释地理现象,这样做是无法使地理学成为科学的,只能停留在哲学的层次上。钱学森的地理哲学是建立在马克思主义哲学与地理科学之间的"桥梁科学",以地理系统是开放的复杂巨系统为理论基础,以从定性到定量的综合集成方法为手段,以国民经济总体发展为实践对象的思想作为地理哲学的核心。在我们研究的天地信息一体化网络系统、人地协调系统和地理遥感信息模型的实践中,提出的航天信息与地面信息辩证统一概念、社会系统与地理系统的辩证统一概念,以及集确定性与不确定性辩证统一的地理复杂

方程,大概可以属于地理哲学的内容。我们是从具体地理科学对象的研究,上升到地理哲学的,与钱学森以普遍哲学规律指导地理哲学的研究,应该是殊途同归的。

作为晚辈,才疏学浅,仅就自己的地理研究,对钱学森地理科学思想的体会,阐述一己之见,没有研究过的领域不敢造次。希望地理科学界、系统科学界,以及相关科学界给予指正,更期望钱学森先生的指教。

参考文献

1 钱学森,等. 论地理科学. 杭州:浙江教育出版,1994.1~325

2 钱学森. 发展地理科学的建议. 见:钱学森等,著:论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994.36~46

3 章申. 环境科学研究与进展. 北京:科学出版社,1980.1~10

4 马蔼乃. 地理信息系统与地理信息科学. 见:马蔼乃·地理科学与地理信息科学论. 武汉: 武汉出版社, 2000. 137,320

5 许国志主编. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000.14

6 马蔼乃.《地理科学与地理信息科学论》. 武汉:武汉出版社,2000.1~357

7 马蔼乃. 论地理科学的发展. 北京大学学报(自然科学版),1996,32(1):120~129

8 钱学森. 要区别"地球科学"和地球表层学. 见:钱学森等著. 论地理科学. 杭州:浙江教育出版,1994.59~66

9 钱学森. 就"地理科学"答《地理知识》记者问. 见:钱学森等. 论地理科学. 杭州:浙江教育出版,1994.90~93

10 许国志主编. 系统科学. 上海:上海科技教育出版社,2000.305~306

11 钱学敏. 地理系统与社会系统. 见:王寿云,于景元,戴汝为等.开放的复杂巨系统.1996.195~239

12 钱学森. 1988 年 10 月 17 日给于景元的信. 见:王寿云,于景元,戴汝为等.开放的复杂巨系统. 1996.264~265

13 浦汉昕. 地球表层的系统与进化. 见:钱学森等著.论地理科学. 杭州:浙江教育出版,1994.16~24

14 钱学森. 长江地区可持续发展丛书.生态经济学必须关心长远的环境问题和资源永续.见:钱学森等著.论地理科学. 杭州:浙江教育出版,1994.33~35

15 马蔼乃. 长江地区可持续发展丛书. 可持续发展与长江地区发展战略. 武汉:武汉出版社,1999. 1~354

16 钱学森. 现代地理科学系统建设问题. 见:钱学森等.论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994. 79~89

17 钱学森. 关于地学的发展问题. 见:钱学森等.论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994.69~78

18 Waldrop M. Complexity, 陈玲译.复杂. 北京:生活·读书·新知三联书店,1997.1~328

19 钱学森,等. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 见:钱学森,等.论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994.94~112

20 马蔼乃. 航天信息与地理信息一体化网络系统及其应用. 北京大学学报(自然科学版),1998(3): 533~541

21 马蔼乃. 遥感信息模型. 北京:北京大学出版社,1997.1~165

22 马蔼乃．地理信息编码模型．见：马蔼乃．地理科学与地理信息科学论．武汉：武汉出版社，2000．283～302
23 马蔼乃．地理图像信息模型．见：马蔼乃．地理科学与地理信息科学论．武汉：武汉出版社，2000．234～247
24 马蔼乃．遥感信息模型与地理数学．北京大学学报（自然科学版），2001（4）：557～562
25 黄秉维．关于地球表层研究的一些看法．论地理科学．杭州：浙江教育出版社，1994．47～58
26 钱学森．要从整体上考虑并解决问题．人民日报，1990－12－31（3）

作者简介：马蔼乃　女，现任北京大学遥感与地理信息系统研究所教授，博士生导师。20世纪60年代开始从事水文学与地貌学的跨学科研究与教学（动力地貌学）；70年代开始从事地理、物理、计算机科学的跨学科研究与教学（遥感与地理信息科学）；90年代开始从事自然科学与社会科学的跨学科研究与教学（天地人机开放复杂巨系统）。培养硕士、博士、博士后50余名。已出版《遥感概论》、《遥感信息模型》、《地理科学与地理信息科学论》等5部专著，发表中英文论文70余篇。曾获国家科技进步奖、省部级奖和教学一、二等奖5次。

钱学森先生为草业科学开辟了一条新路

任继周

一、里程碑性质的贡献

科学家难得,科学战略家尤其难得。钱学森先生以科学战略家的眼光为草业科学开辟了一条新路。我作为草业科学工作者,抱着崇敬而感激的心情来说说自己的感受。

农业大学里有一个学科,称为草原学。按传统的理解:"草原学(Grassland science, Rangeland science)探讨草原资源的存在特征, 草原发生与发展的规律及其开发利用的理论和技术,是农业科学的一个分支"(《内蒙古日报》,1984年6月28日第四版)。这里说的农业,显然是指的大农业。

这个定义说草原学是大农业科学的一个分支,但传统上把它作为农业中的畜牧科学的一个二级分支。例如上述的草原学这个词条就是列在《中国农业百科全书》的畜牧卷里。我国大学的学科系统中,也是把草原学列为畜牧科学下的二级学科。但是遇到一个难以解决的问题,经济水平发展到现在的状况,这个学科所面临的任务,或者说它的内涵,是从草地的生境(大气、土地等自然因素)开始,到草地,到家畜,到产品,到市场流程,这是一个很大的产业系统,它的流程在农业学科各个分支中可能是最长的了。这是一个社会生产系统,而不是单纯资源性的自然再生产。这就是说,草原学处于大脚穿小鞋的尴尬境地。草业科学的内涵超出了上述草原学的传统界限。因此,许多年来,酝酿着学科如何改一个更适当的名称,使它符合科学实际,也符合生产实际。这个问题很长一段时间没有得到解决。

钱学森先生提出"草业"的概念,这就豁然贯通了。

钱学森先生于1984年提出密集型草产业的问题。一年以后,又对草业做了进一步的诠释:"什么是知识密集型的草产业?我的意思是:以草原为基础,利用日光能量合成牧草,然后用牧草通过家畜、通过生物,再通过化工、机械手段,创造物质财富的产业"(1985年6月24日在民族文化宫座谈会上的发言记录)。这里明确指出草业不是传统认识的资源性的自然再生产,而是一个完整的行业。它包含从日光能,到牧草等饲用植物,再到动物生产,再到产品的加工流通等全部生产流程,也是产业化过程。他更具体地说:"草产业的概念不仅是开发草原、种草,还包括饲料加工、养畜、畜产品加工。最后一项也含毛纺织工业"(钱学森,1990年9月17信)。

就在这次会上钱学森先生也提到了农区草业和林区草业,对它们也寄予很大的希望。

钱学森先生的草业概念,虽然肇始于天然草原区,但没有忽视农区和林区的草业。作为一个草产业,将不同地区的同一性质的产业,以它特殊共性概括为一个完整的科学和生产范畴,就是今天我们所说的草业,它包含草原区的草业、农区的草业和林区的草业。我想这是钱学森先生对他最初提出的草产业的发展。如今大学的草业科学就是按照这样一个范畴建立起来的。

经过大家议论,从此把大学的"草原学科"就改为"草业学科"。1999 年国家大幅度调整学科系统,大量合并学科门类,扩大学科领域,把 500 多个学科一下子减少到 250 来个学科。而这时却把草业学科从二级学科上升为一级学科。那就是说,草业已取得了与农业,林业并列的席位。这应该归功于钱学森先生适应时代要求,满足科学和生产发展的需要,及时提出草产业的概念,从而为草业科学提出新的发展领域。

这得从一个故事说起。就是上面提到的在那次民族文化宫草业座谈会上,我有幸与钱学森先生邻座,会上他问我:"我数了数,林业有 16 个产业部门,草业有多少?"这个问题把我问住了,我说不清楚。这是一道难题。搞草业,说不清草业的内涵行吗？当然钱老就草业的性质已经有了基本的界定,但如何在具体内容上加以充实,就是我们草业科学工作者的事了。

怎样回答钱老出的这道难题？对于新型的草业,一时难以提出具体产业项目,因为在产业中它还没有充分发育成熟。但就它的范畴来看,还是有轨可寻的。后来草业学界经过一年多的思考、研究,提出了草业应包括 4 个生产层次,这就是前植物生产层(自然保护区、水土保持区、风景区,以及城乡绿地、草坪运动场等,即不以生产植物、动物产品为目的,而是以其景观价值贡献社会。也不妨称之为景观层);植物生产层(牧草、各类作物、花卉、林木等,光合作用产生有机物的生态 - 生产行为);动物生产层(动物及动物产品);还有外生物生产层(产品的加工、流通等)。这个产业系统提出以后,得到大家认可,使草业具体化了。草业科学有了自己的体系,现在草业科学专业,已经在全国 10 所大学设立并招生。出版了作为中级刊物的《草业科学》杂志和高级刊物《草业学报》,成为学科交流的园地。还出版了《草业科学研究方法》一书,提供了初步的草业科学研究的方法论。这一切应该归功于钱学森先生的战略性指引。

要落实草业的四个生产层次,必须有示范区。钱老不只一次地强调示范区和产业化的重要性。

笔者在 1992 年全国草原学会上有一个发言,把草业的发展划分为四个阶段,每一个阶段都举出它的代表性著作。最后一个阶段草业的代表性著作就是钱学森先生有关草业的论述。可以说,钱学森先生对于草业科学的贡献是里程碑性质的。

二、严谨的治学精神

钱老是一位高瞻远瞩的科学战略家,是大家公认的。但是他的平易近人,细心踏实,

也是令人叹服的。

这里举几个例子：

例1，中国草原学会有一篇给领导的建议，钱老阅后提出："第一页的5.6%应为5.7%，58%应为57%"（1986年11月28日来信）。例2，"经您审阅的贵刊1994年3期1页文中，17.81 km恐有误！（钱学森，1986年11月28日来信）"。经查证，果然应为80 000 km。误差如此之大，真是粗心之至！

第二个例子由于误差太大，有悖于常理，看出来还容易理解。第一个例子，以钱老这样的忙人，居然能看出这样细微的数字错误，不能不令人叹服。

再举一个例子，可以看出钱老在科学问题上的执著。在英文中没有与草业相当的词，如何按照草业的原本涵义，给草业取一个英文名称，是个难题。于是请教钱老。钱老考虑周详，认为应该取一个拉丁词，可以赋予新意而不会与别人雷同，也不至引起歧解。钱老提了两个词，以供选择。一是"Prataculture"，一是"Praticulture"。我对拉丁文不甚了解，于是请教熟悉拉丁文的人，他们认为植物学界通常使用"prata-"字头，表示草本的意思。我就选择了第一个，写信告诉钱老，将"Prataculture Science"定为草业科学的英译名，并且作为刊物的英文名称，出版发行。这份刊物得到国际上的注意，进入英国的CAB检索系统，传播到世界各地。过了一年多，钱老来信说应该用"Praticulture"，不用"Prataculture"（钱学森，1994年7月31日信）。但这时Prataculture已经正式出版发行多时，并被收录于CAB检索系统，为国外部分同行所采用，更改将带来许多不便。为此，我给钱老回信说，看来语言文字一旦进入社会，它已经不属于我们了。钱老回信"您对草业的外文的译名的意见我同意，就不再变动了。将来也就说：任继周教授为草业起了个外文名称。以此载入史册"（钱学森，1994年7月31日信）。这个命名权当然还是钱老的，我不敢僭越。但钱老来信的意思是说同意我的不改动的意见，但Prataculture这个词，还是持保留态度的。既严肃地坚持意见，又礼貌地尊重别人。这件小事，也可以窥见钱老的谦逊和严谨的风格。我写这一段的意思是想说明，如果这个译名有什么不妥，责任在我。

三、关怀、遗憾与信心

钱学森先生对草业是很关心的。关于草业他在不停地思索。例如，有人向他征求关于"十五"草业规划的意见，他说得很具体："一定要有草产业的试验示范点，可以设3个：北方草原一个，北方山地草地一个，南方山地草地一个（钱学森，1991年9月2日信）。"

有人征求他对内蒙草业系统工程试点的意见，钱老详细地写了7条："①要逐步发展人工种草、施肥；②要逐步搞牧草收割，运到饲料加工厂加工；③大力发展饲料加工，现在全自治区饲料加工有发展，已将近每年约2亿斤，但还不够，全区将来应是数亿吨；④要逐步实现集中工厂饲养；⑤综合深度加工；⑥草业要包括多种饲养业，如微生物（单细胞蛋白）；⑦运用系统工程搞好复杂的管理"（钱学森，1986年1月1日信）。

由于钱老考虑草业问题如此细致,对目前的管理水平深感不足。全国偌大的草原,只在农业部畜牧兽医司内部设了一个草原处,这个处人力最少的时候只有4个人。因此,他多次建议要在国务院内部成立草业局。给国务院某一领导同志的信中说:"45亿亩的事业要用几十年的艰苦努力,不能放在眼前工作十分繁重的国家农业部去管。我建议国务院考虑设国家草业局,专管草原与草滩。将来到21世纪,国家会设草业部"(钱学森,1989年1月24日信)。钱老在许多场合都坚定地提出,要在国务院设立草业局,给我的和给其他人的信中也多次提到在国务院内设立草业局。

钱老的时间很宝贵,但对草业关怀备至,几乎有问必答,有信必复。因此,我也经常去信向钱老请教。钱老也常给我来信并把有关材料转给我。信是钱老亲笔所写,字迹工整,也很详尽。从与钱老的通信中,不但得到许多启发和教益,也学到了钱老平易近人,一丝不苟的风格。因此,我也就经常与钱老通信。直到在1992年的一次在友谊宾馆召开的会议上,走进电梯时,我问钱老,有没有可能参加一个与草业有关的会议,他说要少参加一些活动,"已经80岁了!",这句话在我的心上重重地一击,他当时的语气和神态使我终生难忘。钱老已经80岁了!时间不容浪费。从此以后,我很少给钱老写信,即使年节的问候也一律省略,以免分散他的精力,使他集中有限的时间和精力用在更重要的地方。但在这有限的通信中,他几次问到,如华西村那样,草业致富的事例有没有?到目前为止,我还没有发现草业致富达到像华西村那样的例子。本来我暗暗设想,改革开放20周年时,能拿出一两个草业致富的事例,作为向党的献礼,也是向钱学森先生交的答卷。但很惭愧,也很内疚,我们处在这样一个国运昌盛,经济建设一日千里的伟大时代,直到现在竟无法拿出一两个草业致富的事例,以安慰钱老的殷切企盼。

我想钱老在对草业关心的同时,也许还有少许遗憾!这就是从全国来说,国家对草业的管理还没有适应时代的要求;从基层来说,我国还没有出现草业的华西村。

但是,钱老对草业未来的发展是信心百倍的,在他给草业协会成立大会的祝贺信中说:"所以草业协会要大力宣传知识密集型草产业即第六次产业革命的光辉前途,要看到21世纪!光明的未来!"(钱学森,1992年1月1日信)。

钱老这位科学大师的思想博大精深,我深感难以望其项背。何况我与钱老接触不多,而且只限于草业方面。对于他的思想和风格只能写出这些肤浅的体会。

参考文献

1 任继周. 中国农业百科全书·畜牧卷(上). 北京:中国农业出版社, 1996. 72~75

2 任继周, 胡自治, 张自和. 草业科学研究的现状与展望. 见:国外畜牧业·草原与牧草. 1993(2): 1~8

作者简介:任继周 院士。曾任中国草原学会第一、二、三届副理事长。创建草原的气候—土地—植被综合顺序分类法;提出评定草原生产能力的新指标——畜产品单位;提出草地农业系统中系统耦合和系

统相悖的理论;在高山草原丰产研究、高山草地农业系统的研究、草坪的建植区域与生态区域的研究、草地农业系统4个生产层的确立及其生产力动态研究等方面都取得了开拓性进展。创建我国高等院校草原学、草原调查规划、草原生态化学、草地农业生态学4门课程。新西兰梅西大学设立了“任继周教授奖学金”(Professor Ren Jizhou Scholarship)。

钱学森同志对新技术光学发展的杰出贡献

陈 定 昌

钱学森同志在20世纪60年代中期亲自领导和组织了激光雷达和红外位标器的攻关研究，花了近十年的时间攻克了技术关键，集成出了样机。激光雷达对非合作目标——飞机的跟踪精度优于20角秒，红外位标器跟踪火箭距离达300km，填补了国内空白，做出了杰出的贡献。

一、战略眼光、果断决策

国际上1960年才发明了激光，处于初级发展阶段。1965年初，钱老就提出："激光是否可以作为新型能源用于武器探测制导?"随即下达了调研任务，要求写出论证报告。我荣幸地接受了此项任务，经过半年的时间，对国内外的研究情况进行了深入的了解和分析，得出了十分肯定的结论，并写出了《激光在防空导弹中的应用》、《红外在防空导弹中的应用》的报告。钱老在1965年9月组织司局长听取了汇报，并果断地作出了重要决策："像重视发展无线电微波一样，发展激光技术，首先应用到防空导弹制导探测中。"并指示立即在七机部二院二部成立"激光红外工程组"负责组织研制工作，我个人作为首届工程组组长，一直在钱老的指导下开展工作。

二、亲自组织，对激光雷达作出了重要创新性研制部署

在钱老的领导和机关的帮助下，激光雷达和红外位标器及激光引信等被国防科委列为重点项目。钱老亲自到中国科学院找裴副院长、到上海找副市长，形成了三家联合攻关，并成立了协调组和激光雷达总体组。

当时这项技术很新，基础薄弱，为了迅速突破这项工程技术，钱老作了十分重要而又创新的研制部署。他提出："在各专业优势单位联合的基础上，发展系统，搞国家队。在技术上要首先突破关键技术。"他的这个思想在以后的研制中起了重要的作用，并成为以后预研工作的一条创新原则。

三、指导有力突破了关键

研制激光雷达基础技术，材料和重要分系统都存在难关，激光雷达应用到非合作目标还有四个原理问题需要解决：

(1) 由于金属目标存在镜面反射，飞机目标是否有回波?

(2) 天空背景很强,是否会淹没激光回波,探测距离是否很近?

(3) 激光在大气中传播,由于湍流形成抖动,角精度能否达到要求?

(4) 采用大口径和窄波束跟踪是否能形成闭环跟踪?

钱老对突破关键技术有明确的指示:“先解决原理性问题,抓紧实验研究。把材料攻关纳入中国科学院与上海市攻关计划,协助解决。”

在金属目标回波研究中,经缩比模型试验测量,金属目标不仅有很强的后向反射回波,而且在4π立体角内有方向性,存在“增益”。这个发现比美国要早5年以上。激光大气抖动研究,组织了国内几家天文台利用恒星测量不同仰角全程大气抖动值,测量结果证明对空目标跟踪可以达到很高的精度;天空背景很强采用比较对消方案可滤去主要直流分量,其噪声分量约为背景强度开均方根,在采用光学窄带滤光片条件下其量值已低于接收机噪声;研究证明窄波束可以实现高精度跟踪。

经过两年左右的强化攻关,四个原理性问题得到了满意的回答,并经钱老审查认可,经十五院副院长王大珩主持会议评估后得到肯定,为激光雷达研制奠定了坚实的技术基础。

同时在研制中应用材料的新突破,为研制大功率激光发射机奠定了基础。

四、对钱老领导新技术光学研制的学术思想的体会

在钱老的主持下,完成了激光雷达并集成出样机,同时开展了外场飞机跟踪试验,对飞机目标跟踪达到很高的角跟踪精度,比普通炮瞄跟踪雷达精度提高了100倍;红外位标器对伊尔-14飞机跟踪距离大于10km,对火箭跟踪距离达到300km。在不到8年的时间内完成了样机研制,取得了很好的结果,填补了国内空白。这些都和钱老正确的领导和先进的学术思想有密切关系。特别是钱老战略的眼光,果断的决策,为新技术光学开拓了发展道路,所研制的成果和培养的队伍,为以后国内精确制导技术的发展打下了好的基础。

钱老对新技术预研攻关的一整套指导思想,如开门办科研,集国家优势单位组成国家队,在最高的专业技术水平的基础上,加强关键技术攻关,先解决关键、原理和关键元器件,然后分步骤集成分系统、系统,始终重视以系统工程方法指导研制,在基础很弱的情况下,能在较短时间内攻克难关,做出高性能样机。他的这套先进的学术思想和科研方法,使我们跟随他参加具体负责研制的同志受益匪浅,并成为我们终身遵循的指导思想和方法,并在航天型号攻关研制和预研工作中发挥了极其重要的作用。

作者简介:陈定昌　航天系统工程和制导统系统技术专家、国家有突出贡献的中青年专家、国家科学技术部第一届“S-863”计划专家顾问组成员、国家高技术主题首席科学家。承担或参与了多项大型航天系统工程的研制工作,是主要组织者和技术带头人之一。主持开拓了制导与控制的毫米波、红外、微波、激光雷达制导的研究工作。先后获得全国科学大会奖1项、国家科技进步特等奖1项、国家科技进步三等奖1项、部级科技进步一等奖3项、部级科技进步二等奖4项、科工委重要科技成果三等奖2项,光华科技基金一等奖1项、国家“863”计划荣誉奖,撰写专著两部,论文数十篇。

钱学森与建筑科学

鲍 世 行

一、建筑科学的提出与现代科学技术体系的架构

(一)建筑科学大部门的提出

1996年6月12日,钱学森教授在给钱学敏的一封信中,谈到一本关于山水城市的书时说:不久前(6月4日下午)我同这本书的两位主编(指笔者和顾孟潮)面谈,“那天我们谈得很开心”。兴奋之情跃然纸上。

当天谈了什么问题,致使钱老如此开心呢?他在这封信中说:“我们想到可能要确立一门新的科学技术——建筑科学。”“这是现代科学技术体系中的第十一个大部门。这是融合科学与艺术的大部门。”

那么,为什么要提出“建筑科学”这个科学技术的大部门呢?钱老在1996年7月14日给钱学敏的信中说:“提出第十一大部门是强调马克思主义哲学的指导。”“现代社会主义中国要有新时代的建筑,新时代的城市。”“不能跟着洋人跑,也不能迷于中国古代皇宫、富家园林、北京四合院、江南水居。”他还说:“目前这一部门中的现实问题很多,要用马克思主义哲学来推进其解决。”

在这之前,钱学森教授曾提出过一个包括十大现代科学技术体系的构想图(图1)。这10个大部门分别包括基础理论、技术科学和应用技术三个层次。这10个大部门又各自通过自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、人天观、地理哲学、军事哲学、社会论(后来称“人学”)和美学10座桥梁通向马克思主义哲学。

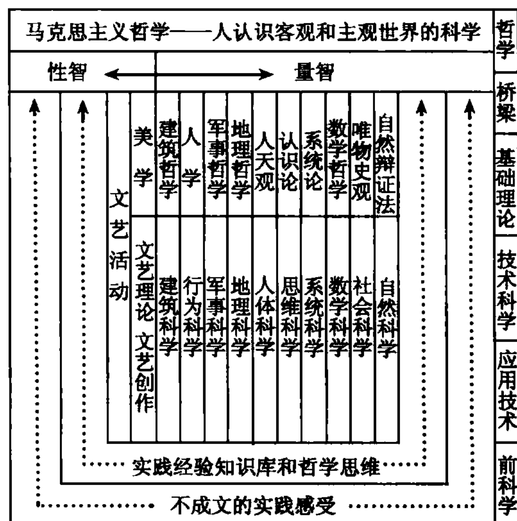


图1 现代科学技术体系构想图

让我们追溯钱学森对现代科学技术体系构想的发展过程。

早在20世纪70年代末、80年代初,钱老就开始思考和研究现代科学体系的问题。钱老的出发点是要“建立起一个科学体系,并运用这个科学体系去解决中国社会主义建设中的问题”。

在1982年以前,钱学森教授在谈到科学技

术体系时，是把现代科学技术仅划分为自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学和人体科学6个大部门。在1986年的一篇文章中，钱学森教授说："后来发现这还不够，忘了我们这些穿军装的了，把军事科学忘了……军事科学到马克思主义哲学的桥梁是军事哲学。"钱老又说："文艺作品不是科学。但是，研究文艺的文艺理论是科学。文艺理论到马克思主义哲学的桥梁就是美学。"还说："今年初，我发现这八门科学、八个桥梁还是不够，发现还有个行为科学……马克思主义行为科学到马克思主义哲学的桥梁，如果暂时起不出更好的名称，就叫它社会论。"

1986年，在第二届全国天、地、生学术讨论会上，钱学森教授又正式提出地理科学作为科学技术的一个大部门。这样与自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、人体科学、思维科学、军事科学、行为科学，还有文艺理论并列，就成为10个现代科学技术大部门。

从这里可以看出，随着实践和认识的发展，这个"现代科学技术体系"是会发展的。而建筑科学作为第11个大部门的提出是现代科学技术体系发展的一个新的高度。

在1996年6月4日以前，钱老在构想现代科学技术体系时，一直把建筑包括在文学艺术之中。1982年钱老说："我曾在谈到科学技术的体系时，把现代科学技术划分为6个大部门：自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学和人体科学，扩大了传统的科学体系。与这相似，我想文学艺术也有6个部门。"钱老认为，这6个文学艺术大部门是：小说杂文、诗词歌赋、建筑艺术、书画造型艺术、音乐和综合性艺术。在说到建筑艺术时，钱老认为："另一个文学艺术的大部门是建筑艺术。我想这不宜只包含土木构筑，还应把环境包括在内，也就是园林艺术，它们本来是一个整体，不能分割。因此，这个部门应该称为建筑园林。"

1984年，钱老把技术美学和园林艺术包括在文艺内。1986年，又把烹饪和服饰美容包括在文艺之内。1987年，又增加了书法，这样文艺就有了11个部门。

总之，从1982年以来，不管把文学艺术分成多少个部门，钱老都是把建筑和园林包括在文学艺术这个大部门之内的。

至于城市规划和城市学，在1996年以前，钱老都把它们分别划入地理科学的应用技术和应用理论层次。

综上可以看出，把建筑、园林与城市3个部分作为建筑科学成为现代科学技术体系中的第11个大部门独立出来，确实是认识上的一大飞跃。它对于建筑科学理论体系的建立具有巨大的推动作用。

(二)建筑科学大部门学科体系的架构

提出建筑科学这第11个现代科学技术的大部门，就有必要增补现代科学技术体系的图表。1996年11月6日，《人民日报》发表钱学敏《钱学森论科学思维与艺术思维》一文时，披露了钱学森教授增补完成的现代科学技术体系的整体构想图(图1)

认真研读这个内涵十分丰富，意义十分深刻的图表，我们可以体会到：

1. 钱学森对建筑科学给予充分的重视

钱老把建筑科学与自然科学、社会科学等部门并列,作为第11个大部门列入了现代科学技术体系,具有深远意义。

现代科学技术体系的建立是伟大的创新行动。钱学森早在80年代中期的一次座谈会上就说过:"我上面讲的整个知识体系的结构大大超出传统的知识分类法,是经典著作中没有的,是不是'离经叛道'呵?离经的罪名可能逃不了了,因为'书'上没有呀;但我自以为不是叛道,是根据马克思主义的普遍原理阐释与发展的。"

2. 建筑科学是科学与艺术相融合的一个大部门

"这一大部门学问是把艺术和科学揉在一起的,建筑是科学的艺术,也是艺术的科学"。钱老把人类全部科学技术知识分成性智和量智两个部分,其中,文学艺术理论和文学艺术创作属性智,而其他9个部分则属量智。现在他把建筑科学置于性智与量智之间,可能也是基于上述出发点。

钱老在讲到"建筑是科学的艺术,也是艺术的科学"时说:"所以搞建筑是了不起的,这是伟大的任务。我们中国人要把这个搞清楚了,也是对人类的贡献。"

3. 建筑科学也有基础理论、技术科学和应用技术三个层次

钱老在《关于思维科学》中说:"由于人认识客观世界是为了改造客观世界,我们划分层次可以按照是直接改造客观世界,还是比较间接地联系到改造客观世界来划分。这就是理论的层次——基础理论层次,直接改造客观世界的工程技术——应用技术层次和介乎这两者之间的技术科学层次。"

关于建筑科学内部的3个层次的组成,钱老在1996年6月4日接见我们时就提出,第一层次是真正的建筑学,第二层次是建筑技术性理论,第三层次是工程技术。钱老的这次讲话为建筑科学体系的架构奠定了基本格局。

4."建筑哲学"是建筑科学通向马克思主义哲学的桥梁

钱老说:"真正的建筑哲学应该研究建筑与人、建筑与社会的关系。"建筑哲学就是要用马克思主义的世界观和方法论来认识建筑,是要用辩证唯物主义和历史唯物论的观点和方法来看待问题,是要解决为谁服务的根本问题。

所谓"桥梁"有两层意思:一方面是现代科学技术大部门要在马克思主义哲学的指导下,也就是要用科学的世界观和方法论去认识世界、改造世界,并在实践中检验我们理论的正确性,从实际出发,实事求是地发展现代科学技术;另一方面,钱老认为:马克思主义哲学是"人认识客观和主观世界的科学",它是"人类一切实践经验的最高概括"。马克思主义不是无源之水、无本之木,它是扎根于科学技术中的,是以人的社会实践为基础的,它是要随着人类的社会实践和科学技术的发展而不断发展的。所以,各个科学技术大部门的发展,也会通过这些哲学桥梁的总结、提升,丰富,发展马克思主义哲学。

5. 科学技术是不断发展的

在科学技术的层次中有"前科学",它包括了"不成文的实践感受",它将再上升为"实

践经验知识库和哲学思维”。它们是科学技术发展的基础和前提。

二、建筑科学的层次划分与城市学、园林学研究

(一)建筑科学的层次划分

1998年5月,钱学森在一封信中说:“我近日想到的一个问题是如何把建筑和城市科学统归于我们说的‘建筑科学’……我建议将‘城市科学’改称为‘宏观建筑’(Macroarchitecture),而现在通称的‘建筑’为微观建筑(Microarchitecture)。”同时,钱老在讲到园林时也多次把它和城市与建筑联系在一起。他说过,“它们本来是一个整体,不能分割”。因此,钱老所称的“建筑科学”实际上包括了城市、建筑和园林3个部分。

至于建筑科学的层次划分,钱学森教授在1996年6年月4日接见我们时说:“我们是不是可以建立一门科学,就是真正的建筑科学,它要包括的第一层次是真正的建筑学。第二层次是建筑技术性理论包括城市学,然后是第三层次工程技术,包括城市规划。”对于第一层次,即基础理论的层次,钱老把它称之为“真正的建筑学”。既然称为“真正的建筑学”,它当然是一门年轻的学科,这就给我们提供了广阔的探索空间。由于建筑科学包括了城市、建筑和园林3个部分,它理所当然地也应该包括真正的建筑学、真正的城市学和真正的园林学3个部分。

1996年9月,钱老在一封信中曾说过:对建筑科学,其基础理论层次的学问,可以是多门学问,不必限于一门学问,例如在自然科学这另一个大部门,其基础理论层次就有物理学、化学、生物学……所以在建筑科学这一大部门,其基础理论层次,也可以有多门学问。

对于这三门学科的总称,我设想可否称为“人居环境学”?钱老在接见我们的当天说:“建筑真正的科学基础要讲环境等等。这个观点要好好地学,思想才真正开阔。”钱老,1996年9月15日给笔者的一封信中也曾说过:“我们要用马克思主义哲学来指导,用建筑科学来建立21世纪社会主义中国人居环境。”可见,建筑科学的中心内容是研究人居环境。

那么,真正的建筑学、真正的城市学和真正的园林学(笔者认为或许可以称为“广义建筑学”、“广义城市学”和“广义园林学”)应该包括哪些内容呢?作为基础理论层次,它当然是理论性比较强的。它作为广泛吸纳其他科学大部门的综合性理论,应该是建筑科学与自然科学、社会科学、系统科学、数学科学、思维科学、行为科学、军事科学、地理科学和文艺之间的交叉学科。它是建筑科学与其他科学大部门相通的横向的桥梁。因此,它必然涉及建筑与人、建筑与社会、建筑与自然、建筑与文化、建筑与科技等相关的内容。

钱老强调科学是个整体,它们之间是互相联系的,而不是相互分割的。钱老是从现代科学技术体系的全局和整体来理解建筑科学,把建筑科学置于现代科学技术体系的全体之中,强调了它们之间的必然联系。这样建筑科学就不再是一个孤立的与其他大部门割裂的部门。由于广泛汲取其他大部门的学术成果,使建筑科学成为生机勃勃的学科,必然会促进建筑科学这个大部门的发展。

最近,笔者读到上海同济大学陈秉钊教授编写的《城市规划系统工程学》一书。这本书把系统分析的方法运用于城市规划,在这方面做了有益的尝试。如果把系统科学与城市学嫁接,并作理论上的阐述,就可以建立城市系统学(或称系统城市学)。同样,思维科学、行为科学……都可以与城市学嫁接,当然更不用说地理科学和文艺了,甚至军事科学也与城市学有密切的关系,过去有一门城市防卫学,专门研究城市中的作战等问题。那么,在现代战争下,情况又将会怎么样呢?这些都值得研究。

建筑科学在现代科学技术体系中的建立,确定了它在体系中的地位,明确了上下左右的关系,这就有利于学科之间的相互借鉴,促进其发展。

当然,交叉学科的建立与发展,需要相关学科的共同努力,而不仅是建筑科学一家的任务了。

以上关于建立建筑科学基础理论学科的想法还很不成熟,这里提出来,向大家请教。

对于建筑科学的第二层次,即技术科学层次,应该包括建筑技术性理论,如城市学、建筑学、园林学等。技术科学层次的学科是工程技术的理论基础。钱学森教授十分重视理论的建设,早在1958年8月,他就提出关于建立城市学的设想,以后又与不少学者、专家共同探讨关于城市学的问题。我们在《钱学森建筑科学思想的由来与发展》一文中把钱老的城市学研究总结为6个特点,即:

①强调理论探索的重要性;②强调必须用马克思主义的哲学来指导城市学的研究;③强调研究城市要用系统科学的观点和方法;④重视研究城市发展中出现的新事物和新问题;⑤重视借鉴国外的经验,走出一条中国自己的城市建设道路来;⑥重视对未来城市的探索。

对于建筑科学的第三层次,即工程技术层次,包括建筑设计、城市规划设计、市政工程设计(道路、桥梁、给水、排水、煤气、热力、供电、电讯……)和园林设计等。现在建筑、城市和园林等专业的学生,在学校里学习的技术与艺术的知识和技巧的相关学科大多属于这一层次。

(二)建立城市学的设想

早在1985年8月,钱老就提出“关于建立城市学的设想”。在1991年4月以后,先后给笔者和扬国权(郑州市建筑设计院总工程师)、梅保华(北京市城市科学研究会常务副秘书长)写信谈建立城市学问题。钱老振聋发聩的建议引起了城市科学界广大学者、专家的重视,纷纷撰文研讨这个问题。在此基础上,1992年2月和3月,分别由中国城市科学研究会和北京城市科学研究会主持在天津和北京召开了关于建立城市学的座谈会。在座谈会上,许多专家、学者,就城市学研究的任务、对象、内容、步骤等方面提出了许多精辟的见解。

在钱老的号召和推动下,城市学的研究蓬蓬勃勃地开展起来。首先是出版了刘歧、张跃庆、梅保华的《城市学》一书。该书是我国早期城市学著作的代表作。钱老在给作者梅

保华的信中说:“可能因为新观点的‘城市学’尚在初创时期,概念还不十分明确,所以,写《城市学》确有许多困难! 更多的、更完善的城市学思想还得研究。”

11年后的2001年1月,又出版了哈尔滨建筑大学唐恢一教授编著的《城市学》一书。该书遵照钱学森关于建立城市学的指导思想,广泛吸收了近年来城市学研究的成果,将城市作为开放的复杂巨系统进行研究,并汲取了如控制论、耗散结构论、混沌学、分形几何学等新兴学科的科学思维,同时也引入了可持续发展、建设山水城市等新思想,是近年来对城市学研究有特色的学术专著之一。

值得注意的是1985年8月,钱学森在撰写《关于建立城市学的设想》一文时,是把城市学包括在地理科学之中。他当时设想的城市科学体系的3个层次是,城市规划—城市学—数量地理学,而城市学是作为一门应用的理论科学,或者说是一种中间层次的技术科学,它既不是应用技术,也不是像自然科学、社会科学那样的基础理论。而在钱学森教授提出建立建筑科学这一大科学部门以后,情况就有所不同了。

(三)园林学研究

钱老对建筑科学的研究始于20世纪50年代,其切入点是园林学。早在1958年3月1日,他就在《人民日报》上发表了《不到园林,怎知春色如许——谈园林学》。在这篇作为钱老研究建筑科学的第一篇公开发表的文章中,可以说对于建筑科学、山水城市等一些基本观点就已基本形成。《谈园林学》一文阐述了如下基本观点:

(1) 把中国园林和传统山水画联系起来了,认为“妙在像自然又不像自然,比自然有更进一步的加工,是在提炼自然美的基础上又加以创造”;

(2) 园林学和建筑学这“两门学问都是介乎美的艺术和工程技术之间,是以工程技术为基础的美术学科”;

(3) “我国的园林学是祖国文化遗产里的一颗明珠”,在新时代中,它“可以为广大人民服务,美化人民的生活”;

(4) “园林学还要继续有新发展”。

1984年,钱老又在《城市规划》上发表了《园林艺术是我国创立的独特的艺术部门》一文。这篇文章讲述了两个观点:

(1) 明确了中国的园林不仅是 landscape, gardening, horticulture(即景观、园技、园艺)3个方面的综合,而且是经过扬弃、进到更高一级的艺术产物,从而在理论上首次阐明中国园林何以堪称“世界园林之母”。

(2) 系统地论述中国园林的不同观赏尺度和层次,可以看成盆景(微型园林)、窗景、庭院园林和宫苑4个层次。

钱老的这些颇具创见的文章在园林界引起了强烈反响。随后,钱老又提出了“山水城市”的概念。

三、21世纪中国城市发展模式——山水城市的探索

钱学森教授正式提出山水城市的概念是在1990年7月31日给吴良镛院士的一封信。信中说："我近年来一直在想一个问题：能不能把中国的山水诗词、中国古典园林建筑和中国的山水画融合在一起，创立 < 山水城市 > 的概念？人离开自然又要返回自然。"钱老的这封信是在读了《北京日报》和《人民日报》关于菊儿胡同危旧房改建为北京的"楼式四合院"的报道后"心中很激动"，于是就提出了"山水城市"的概念。

那么钱老为什么要用"山水"两字来表达他对21世纪社会主义中国城市模式的概括呢？

"山"和"水"联起来用，在中国人的传统观念中是代表"大地"、"祖国"的意思。例如，"江山如画"、"还我河山"等等。至于"山水画"、"山水诗词"、"山水园林"中的"山水"是指"自然"、"景观"(landscape)。在这里"山"已经不只是"mountain"，"水"也不只是"water"。所以，"山水城市"是代表"人与自然"，代表"生态与人文"，代表"科学与艺术"，代表"历史与未来"，代表"物质与精神"，代表钱老"为人民"的思想。钱老"山水城市"的思想博大精深，有很大的包容性，值得我们长期、深入地研究探索。随着研究的不断深化，它的丰富内涵将会不断地揭示出来。因此，征得钱老的同意，我们在英译"山水城市"时，是用了Shan-shui City音译的方法。总之，钱老的"山水城市"是一种"理念"、"思想"，是"理想"、是"战略"，它不仅是"操作层次"，更重要的是它的"战略层次"。

事过近两年，钱老又先后给园林专家吴翼、《美术》杂志编辑王仲和中国建筑学会顾孟潮写信，再次提出"山水城市"。他在信中说："现在我看到，北京市兴起的一座座长方形高楼，外表如积木块，进入到房间则向外望一片灰黄，见不到绿色，连一点点蓝天也淡淡无光。难道这是中国21世纪的城市吗？"

他又说："对于中国城市，我曾向吴(良镛)教授建议：要发扬中国园林建筑，特别是皇帝的大规模园林，如颐和园、承德避暑山庄等，把整个城市建成为一座大型园林。我称之为'山水城市'。"

在钱学森的创议下，1993年2月，在北京召开了有多学科专家、学者参加的"山水城市座谈会"。钱老在会上发表了"社会主义中国应该建山水城市"的书面发言。在这篇书面发言中，他说："这是把古代帝王所享受的建筑、园林，让现代中国的居民百姓也享受到。这也是苏扬一家一户园林构筑的扩大，是皇家园林的提高。中国唐代李思训的金碧山水就要实现了！这样的山水城市将在社会主义中国建起来！"他又说："山水城市的设想是中外文化的有机结合。是城市园林与城市森林的结合。山水城市不该是21世纪的社会主义中国城市构筑的模型吗？"

钱学森的书面发言为山水城市概念的形成奠定了坚实的基础，它对山水城市理论与实践的发展具有深远的影响。

此后，山水城市的理论与实践向纵深推进，一方面在钱老的倡导下，召开了一系列座谈会，如“立交桥——现代城市一景”座谈会，桥车与城市发展学术讨论会和《城市学与山水城市》再版发行座谈会等，深入探讨21世纪社会主义中国的城市发展模式。另一方面，一些城市结合当地情况开展山水城市的研究和实践。其中，重庆、广州、自贡、武汉等城市都开展了专题研究，召开了学术论坛或研讨会，把山水城市的思想注入城市建设规划，列入政府的议事日程，逐步加以实施。

值得注意的是，我国关于山水城市的探索，引起了国际学术界的关注和重视。1993年，在国际城市生态建设学术研讨会上介绍山水城市，引起与会国外学者的浓厚兴趣和高度评价。1995年的世界公园大会宣言中也强调了“山水城市是亚洲式的一种花园城市”。

山水城市能受到各方重视和引起大家支持的原因，钱老分析说：“这次提出建筑科学大部门却引起大家的支持，山水城市也如此。什么原因？这是我们该好好反思的。我想可能有两个方面的原因：

(1)居室及工作环境是人们都有日常体会的。您信中说的群众对您广播讲话的反应不就是这样吗？……

(2)从学科大部门来看(这是学者们重视的)……建筑科学则是自然科学、社会科学和美术艺术的三结合，更复杂高超。

钱老的这一段话值得我们深思。

对此，钱老的态度是：“山水城市的设想能被更多的人所接受和理解是件好事。但我们还要对山水城市做深入的探讨，逐步加深理论”。

另一方面，他又说：“但我也不会忘乎所以地乐观！对山水城市的说法也一定会有强烈的反对意见。”

四、提出与建立建筑科学的轨迹

钱学森提出建立建筑科学大部门的思想，其形成过程大致经历了4个阶段：第一阶段，思想理论准备阶段(1958～1990年)；第二阶段，探索未来城市模式阶段(1990～1993年)；第三阶段，理论发展与实施推动阶段(1993～1996年)；第四阶段，理论升华阶段(1996～2000年)。

钱学森教授对建筑与城市的研究始于20世纪50年代，最早可以追溯到他在1958年3月在《人民日报》上发表的《不到园林，怎知春色如许——谈园林学》一文。钱学森的学术思想还源于他对祖国的热爱。只要细细咀嚼这篇他回国后不久发表的文章的标题和内容，从诗一样的语言中，就可以感受到他对祖国的炽热情怀。这期间，他撰文探讨园林学和城市学，从而为后来“山水城市”的构想做了充分的思想理论准备。

1990年7月以后，钱老先后给吴良镛等4人写了关于山水城市的信函。他说，关于菊儿胡同危旧房改建实践的报道，引发了他近年来关于山水城市的想法和对21世纪中国城

市向何处去的大方向的思索，进而建议召开“山水城市讨论会”，从而引发了一场对社会主义中国未来城市模式的大讨论。在讨论会上，钱老发表的《社会主义中国应该建山水城市》一文，全面地阐述了他对山水城市的观点。

在1993年2月召开的“山水城市讨论会”上，钱学森的书面发言为山水城市概念奠定了坚实的思想和理论基础。此后，钱老又对山水城市的理论发展和实施推动提出了一系列构想。其间，不少相关著作的出版，一些城市开展有关山水城市建设研究和召开专题研讨会，使山水城市的理论和实践在深度和广度上大大推进了一步。

各地山水城市的实践经验，大大丰富和发展了山水城市的理论。正是在这样的背景下，钱老于1996年6月4日接见我们时提出了建立建筑科学大部门的思想，突出了建筑是科学与艺术的结合这一特点。此后，他以系统科学的观点阐述了有关宏观建筑与微观建筑的概念。这是钱老总览建筑科学历史文化进行研究与思考的结果。钱老关于建立建筑科学大部门思路的提出，是他对现代建筑科学理论的升华，在建筑科学发展历史上具有里程碑的意义。

参考文献

1 钱学森. 关于马克思主义哲学和文艺学美学方法论的几个问题. 见:科学的艺术与艺术的科学. 北京:人民文学出版社,1994.111~128

2 钱学森. 我看文艺学. 见:科学的艺术与艺术的科学. 北京:人民文学出版社,1994. 129~134

3 钱学森. 对技术美学和美学的一点认识. 见:科学的艺术与艺术的科学. 北京:人民文学出版社,1994.192~196

4 钱学森. 美学、社会主义文艺学和社会主义文化建设. 见:科学的艺术与艺术和科学. 北京:人民文学出版社,1994.142~158

5 钱学森. 社会主义精神文明建设与文艺工作. 见:科学和艺术与艺术的科学. 北京:人民文学出版社,1994.159~170

6 钱学森. 发展地理科学的建议. 见: 论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994.36~46

7 钱学林. 关于地学的发展问题. 见: 论地理科学. 杭州:浙江教育出版社,1994. 69~78

8 钱学森. 与《文艺研究》编辑部座谈科学、思维与文艺问题. 见:科学的艺术与艺术和科学. 北京:人民文学出版社,1994. 99~110

9 钱学森. 哲学·建筑·民主. 见:论宏观建筑与微观建筑. 杭州:杭州出版社,2001. 293~298

10 钱学森. 关于思维科学. 见:科学的艺术与艺术的科学.北京:人民文学出版社,1994. 23~38

11 钱学森. 1998年5月5日给顾孟潮、鲍世行的信. 见:论宏观建筑与微观建筑.杭州:杭州出版社,2001. 368~369

12 钱学森. 1996年9月26日给顾孟潮的信. 见:论宏观建筑与微观建筑.杭州:杭州出版社,2001. 356

13 钱学森. 1996年9月15日给鲍世行的信. 见:论宏观建筑与微观建筑. 杭州:杭州出版社,2001. 229~231

14 鲍世行,顾孟潮,涂元季. 钱学森建筑科学思想的由来与发展. 见:论宏观建筑与微观建筑. 杭州:

杭州出版社,2001．12～21
15 钱学森．关于建立城市学的设想．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．39～44
16 刘歧,张跃庆,梅保华．城市学．北京:燕山出版社,1990
17 唐恢一．城市学．哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001
18 钱学森．不到园林,怎知春色如许——谈园林学．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．9～11
19 钱学森．园林艺术是我国创立的独特的艺术部门．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．3～8
20 钱学森．1990年7月31日给吴良镛的信．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．164～165
21 钱学森．1992年10月2日给顾孟潮的信．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．170～171
22 钱学森．社会主义中国应该建山水城市．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．359～263
23 钱学森．1995年10月25日给鲍世行的信．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．200～202
24 钱学森．1995年1月25日给鲍世行的信．见:论宏观建筑与微观建筑．杭州:杭州出版社,2001．193

作者简介:鲍世行 1933年出生于浙江绍兴。20世纪50年代毕业于北京清华大学建筑系,长期从事城市规划工作,是我国资深城市规划工作者,研究员。60年代初,在国家机关从事城市规划管理工作,后在四川从事城市规划设计工作。主持的攀枝花市城市总体规划,博得规划界好评,而获得省、部级奖。唐山地震后,以国家建委专家组身份赴唐山、天津参加震后重建规划。80年代在国家城建总局、中国城市规划设计研究院工作,主持学术刊物的编辑工作。90年代后调中国城市科学研究会任副秘书长,主持常务工作,从事城市科学理论研究。主要编著有《城市规划新概念新方法》、《跨世纪城市规划师的思考》、《城市科学希望与未来》、《城市环境美学研究》、《城市流动人口研究》、《中国历史文化名城词典》。编撰有《城市学与山水城市》、《山水城市与建筑科学》、《论宏观建筑与微观建筑》等著作。

科技发展轨迹的宏观探讨

——略论各科技范畴发展历程

罗沛霖

一、引 论

钱学森同志的手稿带回了国内,经过整理后出版了。这是一件重大的事情。中国星弹事业的发展,不仅是我国的大事,也是具有世界意义的。此外,还有他倡导系统工程思想的重要贡献,等等。学森作出的重要贡献是不需我赘述的。他所以有这样的贡献,是由于他爱祖国、爱人类的选择,也是他一生治学严谨且有远见、善创新的风格所助成的。通过《钱学森学术论文集》和这次的《钱学森手稿》,特别是后者,人们会深刻地领略他的这种风格,应当向他学习。他在青年时代,曾以班上最好成绩著称。但从我们当年一些密切的交往中,我深感到他从不是拘泥于追求分数和荣誉,而是博学多才、触类旁通,并充分倾注着对人类、对社会的热情。《钱学森手稿》肯定将对社会发挥极大的影响。

《钱学森手稿》的第五部分是"工程科学",指旨在基本科学与技术之间起桥梁作用的科学。这是在20世纪中昌兴起来并起巨大作用的一个科学范畴。从50年代起我们就强调了这个范畴,在1962年、1978年讨论我国科学技术发展规划时又讨论了这个重要的新科学范畴。由于这个概念对于农、医等方面也是极有意义的,因此采取了技术科学这个范畴名称。从《钱学森手稿》看,学森基于他在飞行器等方面的研究实践,早在20世纪40年代已经加以强调和倡导了。

本文就是在学森这个范畴概念的导引下,试图探讨整个科学技术各范畴的构成和发展历程。这对于我国当前,应是很有意义的。

整个自然科学和技术各范畴之间是怎样的关系?图1是笔者所设想的一个体系框架。当然各个范畴的界线也不是绝对的或一清二楚的。这也只是尽量表达了20世纪中所达到的,并稳定下来的状态,表现的是宏观范畴间的关系,没有涉及各具体学科。本文主要探讨各个范畴形成的历程。

二、蒙昧时代改造客观和认识客观的活动并行启动——原科学的产生

早期蒙昧的时代,人类为了解决生存以及原始文化的需要,生产劳动已经存在了,已能制造自己的工具并使用语言,改造客观的活动就开始了。看看在旧、新石器时代那些伟

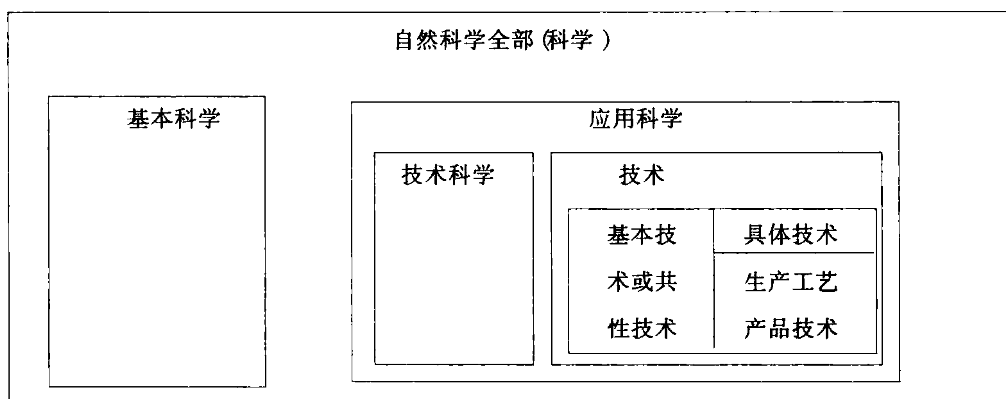


图 1 自然科学和技术体系框架

大的发明：

原始发明：火，撬棒，标枪，斫砸石器工艺，弓与箭，鱼钩与网，岩画……

稍晚时期：玉、石雕磨，动植物驯化，原始居室，陶器，绳，针织，蚕桑，纺织，船与桨，车与轮，乐器(骨笛等)，表意符号……

更晚时期：金、银、青铜的获取、使用，剪刀，玻璃，商业，城市 ……

严肃地考虑这些宝贵而繁多的发明，那都是从一无所有开始，可说是那个时代技术发展很优秀的了。人类已不断地改造客观世界，从而获得了技术知识。

然而，不知考古学和人类学家们是否已证明，那时人类对于自然界是怎么回事是否毫无兴趣？我想像在那个蒙昧的时代已经在对自然界进行原始探索，认识客观事物的活动已经在进行。尽管按后代的发达了的标准说，所形成的概念往往是错误的，或很不准确的，人们称之为自然哲学。但如把万物归之于水(泰勒斯)以及水火土气(亚里士多德)，还有中国的五行说，已趋向于唯物论，则可以说是原始科学或“原科学”了，尽管还是想像的和不准确的。

技术是从改造客观的需要而取得的。科学是从认识客观的要求而得到的。大体说二者的出现不分先后。然而在远古技术出现时，往往就带出了一些具体的科学发现。例如撬棒出现时，也就发现了杠杆增力的原理；船制出时，也就发现了“轻”物浮、“重”物沉的原理。这些发现并不待于阿基米德提出的杠杆和比重的定量关系。历法的应用性是很明确的，但它却带动了天文和数学的启动发展。远古科学发现可以说或来自观察与思辩，或来自生产实践；至于科学实验，那是在文艺复兴后才受到重视的。可能是由于原科学带有很强的思辨成分，所以有自然哲学的称谓。历法、医、卜、星、相的出现也由于人类想掌握自己的命运。追求这种知识也会导向对客观的认知，虽然其中除历法和医学中部分地反映了客观真实以外，充斥了神话和迷信。若只看这些，似乎技术产生在先。

三、西欧文艺复兴——从科学革命到工业革命

在西欧文艺复兴以前，中国的科学技术是领先于西欧的。然而当代的无比丰富的科

学技术发展却是由西欧文艺复兴和科学革命延续而来。因此我们就沿着这条线讨论。中世纪西欧生产落后,社会受到封建教权禁锢。文艺复兴以资产阶级人文主义思想破除封建教权的桎梏,正好为科学大发展创造了条件。开普勒、伽利略、牛顿、达尔文、拉瓦锡等等用新的观测与观念改写了对重要基本事物的认识,进行了一次科学革命。

在哥白尼日心说著作问世的前后,在技术方面也出现了极重要的新事物。谷腾堡在1448年发明了印刷机,把从中国传来的印刷术从纯手工艺转化为机器手工业,在短短50年中给西欧输送传播了900万本书籍。这个事件的重大意义在于:一是为新生事物提供了强大的传播工具或"媒体",对文艺复兴以及以后资本主义革命的一系列重大事件和整个革命运动提供了无比强大的支持。二是应当把它看做是机械化工业革命的先声。按马克思所阐明的,"工业革命……是从……工作机出发",而工作机的要点是人用机器操作工具而倍增了生产能力。因此,印刷机对于手工直接印刷来说,正如哈格利沃思的纺纱机对于手纺轮的改革起到了同样的作用。第二个重大意义是,据说也是基于中国传来的技术,正是采用了中国的冶铁技术和火药造成的枪炮以及指南针"造就"了西欧帝国主义和殖民帝国。

在科学革命的时代,科学与技术作为两类知识,大体上是分道扬镳的。这持续到工业革命的时候。发明珍妮机的哈格利沃思,发明蒸汽机的瓦特等等都是理论知识不多的工匠、技师。这时科学实验也被社会承认了;另外一些人则从事于科学研究,实验的和理论的。当然这也不是绝对的,例如说达·芬奇在艺术和工程技术以至科学方面都有成就,牛顿也是一个很好的土木工程师。此外,如医、农本应是技术学科,但是在它们的发展中却产生并促进了生物和生理等基本科学的发展。治水、采矿、冶金、制药等对于地质、化学也起到了类似的作用。在早期的化学、生物学、地质学的研究主要是为应用的需要而发展的。

四、从工业革命到信息时代——技术科学的兴起

在工业革命以后的时代,18世纪起,基本科学展示了大进展。19~20世纪,尤其在第二次世界大战的推动下,出现了许多重大发明。

在科学进展方面,这里在很有限的范围里,选出几个项目,按时间先后:

(1)流体力学为空气动力学准备了基础;

(2)电磁学的进展导致了电磁波和电子的发现;

(3)相对论提出和原子裂变的发现;

(4)量子力学提出,并为半导体有关的现象作出理论阐释。

在技术发明方面,选出几项,也按时间先后排序:

(1) 无线电通信;

(2) 电子管及以后的半导体晶体管、集成电路;

(3) 航空器；

(4) 电视技术；

(5) 导弹及人造地球卫星和航天器；

(6) 自动化及以后的机器人；

(7) 雷达；

(8) 核能与核武器；

(9)电子计算机。

新的情况出现了。这些科学学科和技术专业之间出现重要的、密切的关联。从它们的发展历程中可以注意到一些带有共性的发展规律。

(1)多原始技术发明发生的时候,同时也就产生了基本科学的概念和知识；

(2)仅由于为了认识客观世界,没有直接应用目的的科学研讨来就没有间断过。

科学与技术沿两个线条并行发展,存在显著的相互促进：

(3)为了应用目的而进行的科学探寻,也会发展为重要的基本科学学科。例如,古代几何学起源于土地面积的测量,当代的则有从电信抗干扰和自动化的研究引出创立信息论和控制论,还有冉斯基在观测无线电通信时偶然发现了银河的电磁波,引致发展射电天文学科的建立,导致天文学的四大发现。

增加出现了三种新型发展过程：

(4)由于基本科学的新发现而导致一种新技术的发明和发展。例如伏打发现用电堆发生电流(1830),导致利用电流的电报机等等。最重大的两个例子是:①电磁波的发现导致了无线电的广泛利用。②原子裂变的发现导致核能利用的发明和发展。

(5)由于基本科学相对地长足发展了,选择基本科学适宜的生长点和联结点,进行旨在提高技术,拓展技术,或者突破难点以至开辟新方向、新途径而进行科学研究。这就是钱学森在手稿第五部分专述的"工程科学",即技术科学。

(6)在技术发展方面,突出了共性的技术研究。重要的例子有关于各个类别产品有关的设计,结构,材料,工艺等等中的基本的、规律性的知识和法则。

对第(5)项技术科学的重要性,在学森《手稿》的第五部分作了充分的阐述,在以后再做一些例说。

作为又一项：

(7)新的,从大量的日常实践中出现的,技术上大大小小的创造发明依然浩如烟海,有的在技术的使用方面,有的在具体技术和产品本身。科学技术术像是一棵大树,没有那数不清的枝叶和根须是不会茁壮生长的。

这里涉及的各个科学技术范畴都可以和引论的表中互相对应。

钱学森列举了在航空航天技术方面具有重大意义的技术科学——Klein 的应用力学,Timoshenko 的材料力学,Von Karman(其实还有钱学森自己)的气流体力学等,事实远不止此。如果再举一些,还有 19 世纪的 Rankine 写了最早的《应用力学》,研究过金属疲劳的问

题,创造了(蒸汽涡轮机的)兰金循环;Poncelet 研究投影几何学,还改进了水轮机,似乎在1820年还写了一本机械加工工艺的书。在电机方面,如 Lamme, Steinmetz, Doherty 等关于交流电机理论的研究,Steinmetz 还发现了磁性材料中的回滞现象。这些是20世纪初在美国出现的。

我是从事电子与信息方面科技工作的。这几乎完全是20世纪以来的事情。这方面的事例是很多的。如在技术科学即应用基础科学方面可以举出以下各分支学科如表1。

表1 技术科学各分科

电子技术科学	电磁波传播学,传输学,微波理论,光波导理论,线路与网络,电子电路学,信号科学 ……
元件与器件科学	应用量子物理与化学,电化学,应用磁学,电介质物理,半导体物理,超导物理,等离子物理,凝聚态物理,金属学,应用光学,应用声学,高分子物理与化学,声光电热磁交互效应,应用热物理,应用力学,结构力学,流体力学 ……
系统与信息学	系统学,运筹分析,信息科学,控制论,自动机学,编码学,思维与认知,逻辑学,语言学,应用心理学,知识学,生物生理电学,生物生理信息学、脑神经学,智能仿生学,可靠性工程学,环境学,混沌理论,分形学 ……
应用数学	应用分析数学,积分变换,应用统计学,计算数学,应用数论,集合论,线性代数,数理逻辑,模糊数学 ……

在基本或共性技术方面,如表2。

表2 电子技术中的若干项目

各种电子产品、模块、构件的计算机辅助设计	
微电子和纳米技术:从制造极高纯度的原材料,到超净化、高精度和特种加工以及复杂的封装、测试,筛选	
电真空设计与制造技术,材料技术	各种成形技术,机械的和非机械的
表面保护技术	浸渍、灌封技术
表面加工	焊接、粘接
测量,测试,计量	压塑技术
环境模拟	标准,专利

18世纪以来,从重大基本科学发现导致重大新技术的发明和发展,几乎是史无前例的。电磁波的科学发现导致了无线电电信的发明;原子裂变的科学发现开辟了核能应用的广大领域,这些都是无可争辩的事实,应当充分重视这些历史现象。但是另一方面,有过一种说法,说是爱迪生的时代过去了,或把极大量的技术进展都归之于基本科学的某些或某个成就。这是不符合客观实际的,是一种十分不利于增强科技、提高综合国力的说法。

举例说,关于半导体和集成电路的辉煌成就,就有一些不同的说法。如果具体追踪它的整个发展史,则可看到是一系列重大的发明,起了巨大的先创作用。首先是在1874年,德国的 F. Braun 已经发明方铅矿石晶体检波器,用于马可尼的无线电通信系统。那时还没有量子论,以后矿石接收机曾风行了若干年。第二次世界大战期间,为了制造微波雷达,晶体二极检波管又兴旺起来,不过这时用的是元素硅或锗的单晶。战后贝尔电话研究

室的负责人 Kelly 提出:电子管的寿命不能再增长了、体积无法再减小了、功耗也不能再降低了,有没有更好的办法? 这样 Shockley 等人才开始研究用固体代替真空,导致半导体晶体管的发明。由此可见半导体晶体管的发明是从三极电子管和晶体二极管得到的启发,和量子力学关系不大。从晶体管走向大规模集成电路,很重要的是平面和扩散工艺以及外延结构的发明起了作用,这里面包含了大量的科学实验工作,但并没有利用量子力学新发现。当然,不可忽视的是在寻找和评估各种有关材料时,半导体物理起了不可少的作用。在许多其他有关的具体环节上,也利用了许多基本科学的成果。

讨论的目的是为了推动我国综合国力以坚定迅速的步伐前进。依靠科技发展是极重要的因素。各个范畴的科学技术必须按客观存在的、相互依存的关系发展,不可以在主观上先入为主,倚轻倚重。

参 考 文 献

1 罗沛霖. 关于发展技术科学. 光明日报,1979

2 罗沛霖. 技术科学在我国国民经济和国防建设中的地位. 自然辩证法通讯,1981,3(4)

3 罗沛霖. 也论人才. 文汇报,1983-8-22

4 罗沛霖. 科学技术环节的选择. 中国科学报,1994-4-25

作者简介:罗沛霖 1913 年生于天津。1935 年上海交通大学电机工程学院工学学士。1952 年美国加州理工学院特荣誉衔哲学博士(电工、物理、数学学科)。中国科学院暨中国工程院资深院士,(国际)电气电子工程师学会(IEEE)终身会士。中国工程院建院倡议人之一。曾任中国工程院主席团成员,电子工业部科学技术委员会副主任,中国计量学会暨中国标准协会副理事长,中国电子学会常务理事,(国际)电气电子工程师学会北京分会会长,中国计算机学会及中国系统工程学会名誉理事。是电子科技国家规划和发展的重要带头人和奠基人。曾具体主持和指导我国第一台超远程雷达及第一组系列化电子计算机启动研制。在电机、电器、电子电路、电信、雷达、电子计算机、工艺选择准则、科学学、数理宏经济学方面均有创新贡献。获 2000 年度中国工程科技奖和 1984 年(国际)电气电子工程师学会建会百年功勋奖。

科学的理论　力量的源泉

董智勇

著名科学家钱学森教授十分关心和支持我国的林业和治沙事业。早在1984年8月20日，钱老在《农业现代化探讨》刊物上，发表了一篇具有理论意义和战略意义的文章，提出“创建农业型的知识密集产业——农业、林业、草业、海业和沙业”。这篇文章的发表，突破了传统农业的局限，开拓了人们的视野和思路，为国内外所关注。

钱老在1991年3月召开的全国沙产业研讨会上，又作了一次极为重要的讲话。他殷切地关怀我国创建沙产业和沙漠的治理与开发。他提出：“假使我们运用全部的现代科学技术，包括物理、化学、生物学这样的基础科学，能不能让这16亿亩的沙漠戈壁每年也提供几千亿元的产值呢？有没有这个可能，这是个很值得研究的问题”。他预言“农业、林业、草业、海业和沙业，假使这五个产业都实现了，将又是一次产业革命，即第六次产业革命……可能在下个世纪出现。”钱老满怀信心地说：“我们中国人是有能力、有智慧的，建立沙产业，咱们中国人能不能带个头啊！我看一定能成功的。”

1993年12月6日，应钱老之邀，中国科协书记处书记刘恕研究员、《人民日报》记者谢联辉同志和我，去他的办公室专门座谈了沙产业和林业问题。我向他汇报了我国林业发展概况、需要研究的问题和今后设想，同时，谈到我国沙漠和沙漠化的现状，防治沙漠的工作情况。他认为，对中国威胁最大的是森林少和土地沙漠化。林业要转变经营思想，加快发展。从现在开始，要研究中国的西部问题，特别是中国西部沙漠的治理与合理开发问题。我问钱老：您看中国西部都包括哪些地区？他说，中国西部应该是指兰州以西、成都以西和昆明以西的广大地区。当然对与其相邻的省区也要注意研究。因为总的来看，都是生态环境比较脆弱、经济发展缓慢、自然资源开发潜力很大，人民生活水平和沿海地区有较大差距。当谈到防沙治沙问题时，他说防治当然重要，通过实践也积累了许多经验，成绩很大，但沙漠也是一个重要的自然资源，应该看到它的巨大潜力，合理发展、利用沙漠这个自然资源，对推进当地经济发展和社会进步，提高人民群众的生活水平，也是值得认真研究的一个重大问题。钱老的这一论述，使我深受启发。

1994年9月21日，钱老写信给“钱学森建立沙产业理论十周年纪念会”的同志们。他在信中指出：“我国有153万平方公里沙漠戈壁和沙漠化土地，而且沙漠戈壁不是没有生物，我们应该让生物利用太阳能为人类创造财富。”他在信中满怀深情地说：“我们现在有伟大的中国共产党领导的社会主义中国，一定能把153万平方公里的沙漠戈壁和沙漠化土地，通过建立沙产业而改造成绿洲。”

1994年9月29日,钱老在会见沙产业研讨会的代表时,在讲话中又明确提出:“沙漠戈壁不是完全不毛之地,关键在于我们要经营,用科学技术来经营管理”,“沙漠要充分发挥它的作用,那就靠沙产业了”,“在不少于100年的过程中,改造利用沙漠,这就是沙产业的任务”。他指出:“沙产业前途无量,但必须要组织起来,有效地组织进行,这是个很大的问题。而且这个组织是社会主义市场经济体制下的组织”,他强调“开发利用沙漠要立法,同时用现代科学技术、生物技术来发展沙产业。”

钱老是以新的理论思维,指出了利用沙漠的方向、手段和方法。这种农业型知识密集沙产业,可以理解为以农业转化太阳能为途径,依据生态经济原理确定沙区产业发展方向和选择高效益品种,采用现代高科技和管理手段,达到沙业的高产出和高商品率的一种高产高效益的经营技术和管理体系,突破了传统的劳动密集型生产体系,强调生产的社会化,具有大生产、大流通、大商品的特点,突破了传统的自给自足的区域经济的范围。这种农业型知识密集沙产业,将指导沙业建设,实现持续高效的沙漠治理开发战略,具有强大的生命力。

多年来,钱老时刻都在关心我们的农、林、沙业的发展情况,他为中国的繁荣富强和进步,倾注了大量心血,使我们敬佩和深受教育!党中央、国务院进一步关怀我国的林业和防沙治沙事业。1992年和1993年,国务院连续召开了全国防沙治沙工作会议,制订了防沙治沙规划,并且增加了投入。特别是中央提出西部大开发的战略决策,更加鼓舞全国各族人民为创造美好的未来而努力奋斗。恩格斯在《自然辩证法》一书中指出:“一个民族,要想站在科学的最高峰,就一刻也不能没有理论思维”,而钱老所倡导的建立沙产业的理论思维和战略思想,不正是推动我国沙产业迈入一个更高境界的力量源泉吗?

欣逢钱老九十寿辰,衷心祝愿钱老健康长寿!

作者简介:董智勇　现年74岁,教授级高级工程师。曾任林业部副部长兼部科学技术委员会主任委员、中国林学会第七届理事长、中国治沙暨沙业学会理事长、中国野生动物保护协会副会长等职。现任宋庆龄基金会野生生物保护基金管理委员会会长。长期投身于新中国的林业建设,认真贯彻执行党和国家的林业方针政策,在绿化祖国、科技兴林和保护野生动物、维护生态平衡等方面做了大量的卓有成效的工作。先后共发表论文50余篇,主持编写了《世界林业发展道路》、《生态林业理论与实践》、《当代中国林业》等著作。

钱学森的科学观

冯 国 瑞

著名科学家钱学森不仅在工程技术、技术科学、基础科学方面作出了一系列卓越的贡献,而且作为一位科学战略家,在科学观方面也提出了丰富而深刻的理论见解。研究钱学森的科学观,对发展现代科学技术、推进马克思主义哲学、实施科教兴国战略、提高整个中华民族的综合素质,不仅具有深远的理论意义,而且具有重大的实践价值。

(一)科学是认识世界的学问

钱学森的科学观首先考察了科学的内涵,即科学的本质。在这一方面,他提出了一系列重要而深刻的理论观点。择其要者,大致如下。

1. 科学的内涵

什么是科学?对此,古今中外是见仁见智,众说纷纭。有的主张,科学是"由人类的想像力构想出的广阔领域的系统性概念化结构……"有的认为,"科学是精神文化最重要成分,是人类认识的高级形式,是不断发展的各种知识体系……"也有的认为,所谓科学,主要是指自然科学,至于社会科学的许多理论,包括哲学在内,很难说够得上是一种科学。那么,究竟什么是科学呢?钱学森认为,科学是认识世界的学问,即人对客观世界的理性认识。为什么?因为科学是探求未知领域的学问,是对世界的本质与规律的理性把握。因此,应当从人类知识体系的动态网络系统和马克思主义哲学的理论高度去考察什么是科学的问题。据此,钱学森指出:"马克思主义哲学认为,客观世界是不以人的意志为转移而存在的,人首先要认识客观世界,才能进而改造客观世界。从这一基本观点出发,认识客观世界的学问就是科学,包括自然科学、社会科学等等。"

2. 科学划分的根据

要考察科学划分的根据,就应当从矛盾特殊性的角度去加以研究。毛泽东指出:"科学研究的区分,就是根据科学对象所具有的特殊的矛盾性。"正因为如此,又因为科学对象的本质与规律是复杂的动态网络系统,具有不同广度、不同深度和复杂性意义上的不同的矛盾特殊性,因而科学研究应该去探索本质与规律的复杂的动态网络系统中不同的矛盾特殊性。根据这样的科学思路,钱学森不仅提出了宇宙演化过程的五种矛盾特殊性及其辩证统一的矛盾特殊新质,即胀观、宇观、宏观、微观、渺观及其辩证统一的系统新质,而且构建了现代科学技术体系的复杂的动态网络系统。

3. 科学应当探索深层的本质与规律的问题

在考察什么是科学的问题时,应当考虑到,由于科学的本质是对世界的本质与规律的

理性把握,而世界的本质与规律又是一种复杂的动态网络系统,同时,科学研究领域的区分,又是根据矛盾的特殊性来区分的,因此,必须把握新发现的本质与规律及其矛盾特殊性。比如,应当注意正确处理确定性与随机性的关系问题。国际上的一些科学家鉴于现代科学的发展和经典科学的局限性,提出了确定性的终结的观点。这种观点当然有其进步之处,因为它认识到线性决定论的局限,这种线性决定论不能处理现代科学前沿水平深层的问题。但是,这种观点片面地否定确定性,而未能把确定性与随机性辩证地统一起来加以处置。钱学森则坚持认识的辩证法,比较好地处理了这个科学问题。他认为,一个层次的非决定性(随机性)可能存在着高一层次或深一层次的确定性。他曾举例说:"微观层次是量子力学所表现出来的非决定性,实际是决定性的渺观层次中十维时空运动的混沌所形成的。本来是决定性的运动,但看来是非决定性的运动。这是因为超弦的渺观世界是十维时空,有六维在微观世界中看不见,不掌握,因而有六个因素没有考虑,漏掉了,可以说是因为微观世界科学家的'无知',造成看来是决定性的客观世界,变得好像是非决定性的了。"钱学森关于决定性与非决定性关系问题的见解,尽管在科学界和哲学界褒贬不一,但笔者认为,这一见解既体现了客观世界的辩证法,也揭示了科学探索的复杂性,因而这是一种很有意义的见解。当然,这一见解尚需科学发现的事实来证明,然而这毕竟是一种前瞻性的探索。

(二)科学是复杂的动态网络系统

科学是复杂的动态网络系统,这是钱学森科学观的一个重大的理论贡献。对此,笔者稍做展开式的探讨。

1."科学是系统"思想的发展

科学是系统,这一思想并不自钱学森始,这一思想有一个漫长的发展过程。近代以来,黑格尔就曾提出过科学是系统的思想。马克思认为,自然科学与社会科学必将交叉、结合,形成为统一的整体科学体系。因为"历史本身是自然史的即自然界成为人这一过程的一个现实部分。自然科学往后将包括关于人的科学,正像关于人的科学包括自然科学一样:这将是一门科学"。恩格斯认为,从19世纪中叶以来,由于科学发展的伟大进步,自然科学已经从经验自然科学上升到理论自然科学的新阶段。在这个新阶段里,更应当坚持主观辩证法是客观辩证法辩证反映的观点。因此,一方面,应当"意识到自然过程的辩证性质","自然科学的系统化,除了在现象本身的联系中是找不出来的";另一方面,科学发展进程本身要求进行辩证的综合和理论的思维,对自然科学"予以系统化",从而"促使理论自然科学发生革命"。恩格斯总结了科学发展的历史经验,研究了当时科学发展的现实状况,深刻地预见到科学发展将通过种种"接触点"、桥梁和中介而走向整体化、系统化。他指出:"在分子科学和原子科学的接触点上,双方都宣称与己无关,但是恰恰就在这一点上可望取得最大的成果。"正是由于这些"接触点"的中介,沟通了学科间的彼此联系,使各门学科出现系统化、整体化的崭新局面。而且,恩格斯对当时科学发展的现状,特别是对

具有里程碑意义的科学成果(如能量守恒与转化定律的建立、细胞学说的诞生和生物进化论的创立)做深层次的研究,指出:“我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”列宁在1904年根据科学发展综合交叉的总体趋势,预言20世纪将会出现“从自然科学奔向社会科学的强大潮流”。而且,列宁把科学的发展放在真理是过程的认识辩证法的总的过程中加以考察,指出“科学是圆圈的圆圈”。

2. 科学是复杂的动态网络系统

钱学森认为,科学是复杂的动态网络系统。这既是对科学史和哲学史上关于科学是系统的思想的直接继承,也是对现代科学技术发展现实的理论总结。这是一种综合性的理论创造。钱学森提出的现代科学技术体系,即现代科学技术从横向上分为10大部门,每一大部门从纵向上又包括应用技术、技术科学、基础科学三个层次。10大部门通过10座桥梁与马克思主义哲学相联接。同时,在前科学领域,既包括实践经验知识库和哲学思维,也包括人们的不成文的实践感受。这些领域的知识在一定的条件下,也都可以进入科学技术领域,而与现代科学技术一起成为丰富、深化、发展马克思主义哲学的知识原料和思想素材。钱学森还找到了构建现代科学技术体系的不同层次的中介学科,使科学的动态网络系统得以建立起来,例如技术科学。钱学森指出:“技术科学。它是从自然科学和工程技术的互相结合所产生出来的,是为工程技术服务的一门学问。同时,对技术科学研究的成果再加以分析,再加以提高,就有可能成为自然科学的一部分”。钱学森正是由于找到了不同层次的中介环节,才构成了现代科学技术体系的动态网络系统。不仅如此,钱学森还把科学研究过程当做一种社会网络系统来加以观察和处置。他认为,考察科学研究过程,从微观即从一个单位内部来说,不仅有科学技术的研究和研制工作,而且还要有科学技术的组织管理工作。这种组织管理工作又分为科学技术的参谋工作和科学技术的后勤工作。前者的内容包括:“一方面是根据我们具体情况,培养科学技术干部要把专业分得细;另一方面,国家的科学技术任务一般又带综合性,要多方面、多专业的工作者共同来完成,做到互相配合,步调一致。”后者就是要保证科学技术研究和研制工作得以顺利进行的各种支持、保障工作。“上述参谋工作和这里所说的后勤工作,可以统称之为科学技术研究和研制工作中的组织管理工作”。从宏观来说,钱学森认为,“全国范围的科学技术组织管理问题,那是社会主义建设组织与计划的一部分”,那更是一种复杂的、动态的社会网络系统了。钱学森的现代科学技术体系是一个复杂的动态发展的网络系统。1991年,钱学森指出:“这个科学技术体系是开放的系统,不断演化的,随着社会的进步,内容会发展变化,会有新的大部门出现。所以构筑现代科学技术体系是长期任务。”后来,他提出了建筑科学与建筑哲学,就是他这一科学思想的重要发展。可见,在科学技术发展的问题上,钱学森坚持了认识辩证法的思想,主张走开放式的发展道路。这同那种囿于一时一地的见解而陷入凝固化、静止化的形而上学的科学观形成鲜明的对照。

3. 开放的复杂巨系统的理论与方法

钱学森的科学观中一个杰出的贡献是开放的复杂巨系统的理论和方法。这种理论和方法本身也作为科学是复杂的动态网络系统的重要内容,但因其是钱学森的科学观中的一个重大的贡献,所以我们把它单列出来加以研究。

(1) 人类智慧的新成果。科学史和认识史表明,人们从不同层次、不同视角对客观世界进行认识,这些认识成果都是人类智慧的结晶。在科学史和认识史上,如何把统一的客观物质世界的内部联系揭示出来,从认识成果中以综合交叉的形式反映出来,这是人类智慧所要研究的新课题。钱学森根据马克思主义哲学的基本原理,总结了现代科学技术的综合成果,特别是交叉科学的最新进展,提出了开放的复杂巨系统的理论。这是人类智慧的新成果。这主要表现在:首先,贯通了自然科学、社会科学与思维科学;其次,抓住了前沿综合的认识难点。

(2) 物质统一性的新揭示。恩格斯认为:"世界的真正的统一性在于它的物质性,而这种物质性不是魔术师的三两句话所能证明的,而是由哲学和科学的长期的和持续的发展所证明的。"他还指出:"我们所接触到的整个自然界构成一个体系,即各种物体相联系的总体"。"宇宙是作为无限的进步过程"而存在着的。开放的复杂巨系统的理论对客观物质世界统一性的揭示,主要有三个方面的理论贡献。

首先,五"观"(胀观、宇观、宏观、微观、渺观)理论揭示了客观物质世界的新的统一性;

其次,四"统"(人脑系统、人体系统、社会系统、地理系统)理论从复合系统、复杂系统方面揭示了客观物质世界的新的统一性;

再次,从规律性方面揭示了客观物质世界的深层的统一性,并分为三个方面:①网络性;②共同性;③决定性。

(3)方法论上的新桥梁。列宁指出:"仅仅'相互作用'=空洞无物,需要有中介(联系)。"他还认为:"要真正地认识事物,就必须把握住、研究清楚它的一切方面、一切联系和'中介'。"钱学森提出的"从定性到定量的综合集成方法"、"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"以及总体设计部方法,在方法论体系方面作出了重大的理论贡献:首先,起了中介的作用;其次,找到了实现认识圆圈的认识方法;第三,给出了实现认识辩证法的一种运行机制的组织形式;第四,体现了理论与实践结合的辩证性。

(4) 认识论上的新综合。钱学森提出的现代科学技术体系、开放的复杂巨系统理论以及从定性到定量的综合集成方法,等等,在认识论方面也作出了一系列重要的理论贡献:首先,坚持了认识辩证法的思想;其次,展现了认识论从中发展的知识领域;再次,体现了知识体系的辩证性。

(三)科学的社会功能在于造福人类

科学,既具有认识世界的功能,又具有改造世界的功能。这两种功能的辩证综合,集中地体现为科学的社会功能在于造福人类。

1. 科学的认识功能

钱学森不仅提出了科学是认识世界的学问,而且他自己所走过的科研道路就体现了他的这种科学观的认识轨迹。几十年来,他从工程技术到技术科学再到基础科学,然后上升到现代科学技术的综合交叉与马克思主义哲学,构建了科学的、动态的现代科学技术体系。在这个过程中,他不仅深刻地考察了科学技术发展的历史性、现实性、交叉性的发展历程和总体趋势,总结了其中的思想精华和基本经验,而且作为一位科学战略家,他对科学技术发展的情形、特点、关系、本质、规律和功能作了前瞻性、综合化、创造性的研究,提出了许多创新性的科学思想和理论见解。这些思想和见解都深刻地表明了科学的认识功能。

2. 科学的实践功能

钱学森认为,科学技术也是改造世界的强大的精神武器。

(1) 科学革命是四大革命之首。在当代社会条件下,科学的实践功能,很重要的一个方面是通过科学革命与技术革命、产业革命、社会革命的辩证关系表现出来的。而科学革命是这四大革命之首,它转化为改造世界的强大的精神因素和智力动力。

(2) 要用现代科学技术建设有中国特色的社会主义。科学无国界,科学应当为整个人类造福。科学家有祖国,科学家首先应当为祖国人民服务。钱学森正是这样一位杰出的爱国的科学家。几十年来,钱学森从一位科学家、爱国者走上马克思主义者的道路,使他忠心耿耿地献身于社会主义祖国的伟大建设事业。伟大的爱国之心和坚定的马克思主义信仰,促使他总结实践经验,创造科学体系,理论联系实际,面向新的世纪,要使社会主义祖国巍然屹立于世界的东方。很多科学家都还记得这样的情景:在中南海紫光阁,江泽民见到钱学森时亲切地问候他,谦虚地说:“您好!您是我的学长,现在身体怎么样?”当得知钱学森获得“小罗克韦尔奖章”和进入“世界科技与工程名人”的行列后,江泽民向他表示热烈的祝贺,称赞他是“中国人的骄傲”。钱学森八十寿辰的前夕,在1991年10月16日举行的授予钱学森“国家杰出贡献科学家”荣誉称号和一级英雄模范奖章的仪式上,江泽民同志代表党和国家发表了热情洋溢的讲话。他称赞“钱学森同志是一位具有高尚的爱国主义精神,坚定不移地为社会主义事业奋斗的战士。……钱学森同志是我国爱国知识分子的典范,他的经历体现了当代中国知识分子追求进步的正确道路”。就在这次会上,钱学森作了即席发言,一方面,他真诚地表示应当把荣誉归于祖国和人民;另一方面,他又表达了自己晚年的打算和心愿,他说:“我认为今天科学技术不仅仅是自然科学工程技术,而且是人类认识客观世界、改造客观世界的整个知识体系,而这个体系的最高概括是马克思主义哲学。我们完全可以建立起一个科学体系,而且运用这个体系去解决中国社会主义建设中的问题。”他并且表示:“我在今后的余生中就想促进一下这件事情”。确实,几十年来,钱学森在应用力学、喷气推进与航天技术、工程控制论、物理力学、系统工程、系统科学、思维科学、科学技术体系与马克思主义哲学等与祖国社会主义现代化建设相结合方面,都做出了杰出的实践成就和理论贡献。

不仅如此，钱学森还运用他的现代科学技术体系特别是开放的复杂巨系统的理论和方法，展开为社会主义现代化建设的九大方面，尤其是其中的现代科学技术与社会主义精神文明建设的关系，更加凸显了他的科学技术为社会主义现代化建设服务的科学观点。

(四)现代科学技术与马克思主义哲学的辩证关系

钱学森认为，一方面，现代科学技术应当以马克思主义哲学为指导；另一方面，现代科学技术又可以丰富、深化、发展马克思主义哲学。钱学森作为著名科学家，他在考察现代科学技术与马克思主义哲学的辩证关系时，更侧重于阐发马克思主义哲学对现代科学技术的指导作用。

1. 马克思主义哲学是人类认识的最高智慧

钱学森指出：马克思主义哲学"是对人类知识、理论的最高概括"，马克思主义哲学，辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括，同时，"马克思主义哲学也是人类一切实践经验的最高概括"(钱学森 1994 年春致钱学敏的信)。因此，马克思主义哲学是人类认识的最高智慧，是人类知识体系中的最高层次。1987 年，钱学森指出："要有智慧就必须懂得并会用马克思主义哲学去观察客观世界的事物。这样我们就重新肯定了哲学的涵义：智慧的学问。但更明确了，必须是马克思主义哲学。"他还认为："发展交叉科学必须要用马克思主义哲学作指导"、"如果能在交叉科学的研究中用好马克思主义哲学，那交叉科学在我国的发展，前途是光明的。这是必然的，无疑义的。"

既然马克思主义哲学是人类认识的最高智慧，是人类知识体系的最高层次，因此，"基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导"、"马克思主义的哲学既然是人类社会实践的最高的概括，它就应该对自然科学、社会科学、技术科学、数学和工程技术的发展有指导作用。必须承认这个指导作用。"

钱学森在论述马克思主义哲学对现代科学技术的指导作用时，他有一个显著的特点，就是不仅从总体上、从现代科学技术体系的架构上阐明马克思主义哲学的指导作用，而且从分体上、从内容上深入地揭示了马克思主义哲学的这种指导作用。比如，从定性到定量的综合集成方法与马克思主义哲学的关系就是如此。钱学森于 1991 年 8 月 12 日在致于景元的信中指出："我们的从定性到定量综合集成法是建筑在《实践论》的基础上的，现在要说，从定性到定量综合集成法的工作过程是以《矛盾论》为指导思想的。"因为"在建立数学模型的曲折过程中，要发现主要矛盾及矛盾的主要方面，而且要千万记住：矛盾是在发展运动，会转化的"。同年 7 月 22 日，钱学森在致于景元的信中也曾指出："我们的中心观点是事物的矛盾及矛盾的不断发展变化"、"因此要完善提高从定性到定量综合集成技术要引用《矛盾论》。"正因为马克思主义哲学对现代科学技术具有指导作用，因此就应当重视和坚持这种指导作用。而如果忽视和否定这种指导作用，那将是危险的。钱学森认为："所有的科学技术工作，自然科学、社会科学、技术科学、数学、工程技术，不用马克思主义哲学来指导，或者不重视马克思主义的哲学对于科学研究的指导作用，是危险的。"他还指

出:“应用马克思主义哲学指导我们的工作,这在我国是得天独厚的。从我个人的经历中,我的确深有体会:马克思主义哲学确实是一件宝贝,是一件锐利的武器。我们在搞科学研究时(当然包括交叉学科),如若丢弃这件宝贝不用,实在是太傻瓜了!”1992年9月17日,钱学森在致笔者的信中,一方面,对我们组织现代科学与马克思主义认识论讨论班给予肯定,另一方面又指出:有些“搞自然科学工程技术的自以为‘务实派’,而不知他们正在脱离马克思主义哲学这个最大的‘实’,危险啊!”

2. 现代科学技术可以丰富、深化、发展马克思主义哲学

钱学森认为,在现代科学技术体系中,条条道路都通向人类认识的最高智慧——马克思主义哲学,虽然这些道路有些是直接的,有些是迂回的。他指出:“马克思主义的哲学也就是人类社会实践的最高概括的理论,随着人类的社会实践的不断发展,新事物的出现,当然要不断地充实、发展马克思主义的哲学。”又说:“马克思主义哲学本身是要发展的,它要随着人类社会实践的积累而发展。发展了的自然科学、社会科学、数学、技术科学、工程技术,又影响马克思主义哲学的发展。”为什么? 因为现代科学技术和马克思主义哲学都是开放的复杂巨系统,它们在辩证互动的过程中交互作用,辩证发展,马克思主义哲学应当从自然科学、社会科学、技术科学、交叉科学等前沿成果中汲取营养,经过提炼和升华,成为丰富、深化、发展自己的思想素材和方法原料。钱学森还从分体上即从典型案例上具体而又深入地阐明了现代科学技术是如何丰富、深化、发展马克思主义哲学的。例如,对从定性到定量的综合集成方法和研讨厅体系,钱学森就作了典型的案例考察。他指出:“我看从定性到定量综合集成法,实质上体现了辩证思维,是应用知识工程及信息技术来完成陈云同志提出的‘不唯上、不唯书、只唯实,交换、比较、反复’。”他还指出:“用马克思主义哲学为指导,我们在学习领会毛泽东同志和老一辈无产阶级革命家的言论后,结合现代科学,提出从定性到定量综合集成法,是认识方法论上的一次飞跃。”他还认为:“在社会主义中国,我们把这个宝贵经验(指 seminar——引者注)与马克思列宁主义毛泽东思想和现代科学技术结合起来,这就是厅。”“这个厅是21世纪的民主集中制工作厅,是辩证思维的体现!”这一套体现了科学方法论与社会主义制度的有机结合。钱学森指出:“这一套实际也是千百万革命者在中国革命战争中流血牺牲的经验总结。所以我们的大成智慧工程和综合集成研讨厅体系是有革命性的,资本主义国家是想学也学不了的! 我们真正贯彻民主集中。”

(五)科学技术与人才培养

随着社会的发展和现代科学技术的进步,人才的重要性日益突出出来,人才培养的素质要求也日趋全面、综合和高质。钱学森关于科学技术与人才培养的科学思想,大致上可以从如下三个方面来加以说明。

1. 科学技术是提高整个中华民族综合素质的重要内容

当代社会实践的发展和现代科学技术的进步,日益显示出社会实践过程是由实践主

体、实践对象和实践手段组成的复杂的动态网络系统。在这个网络系统中,实践主体处于支配的地位,起着决定的作用。这样,要推进社会网络系统,就必须提高实践主体的综合素质,而要提高实践主体的综合素质,就应当加强社会主义精神文明建设,全面提高实践主体的思想道德素质和科学文化水平。

同时,钱学森认为:"科学技术成为生产力的精华,没有科学技术就谈不上生产力,这就是'智力战',21世纪是智力战时代。""科学技术被用来改造客观世界就是生产力,科学技术作为人认识客观世界的一种知识并上升到哲学,这就是文化。"因此,钱学森指出:谁掌握了科技进步的制高点,谁就掌握了国民经济的制高点,谁就可以在以科技为基础的综合国力的国际竞争中处于领先地位。而科技靠人才,人才靠教育。教育领域应当源源不断地培养出高素质的人才。这些人应当达到"周恩来同志、聂荣臻同志领导'两弹一星'工作时,向参与人员提出的要求:①高度的革命觉悟(即一切为了集体事业,不惜牺牲自己)。②高度的组织纪律性(即服从集体的决定,决不固执己见)。③高度的科学性(即一切按已知的客观规律办)。这是周恩来同志、聂荣臻同志把打大规模解放战争的一套成功经验移植到'尖端技术'工作中来了。"

尤其应当重视和培养中华民族的创新精神和创造性思维。创新和创造是科学探索的基本任务,是民族精神的灵魂,是社会进步的不竭动力。因此,要能高瞻远瞩、非常敏锐地找到科学技术的生长点,取得科学技术的重大突破就更应当着力培养这种创新精神和创造性思维。钱学森认为,跨度越大,创新程度也越大。而这里的障碍是人们习惯中的部门分割、分隔,打不通。大成智慧教我们总揽全局,洞察关系,所以能促使我们突破障碍,从而做到大跨度地触类旁通,完成创新。

这样看来,全面提高整个中华民族的综合素质,这是根本。

2. 关键是培养各级领导人才

钱学森认为:"现代领导人才的培养,特别是高级领导人才的培养,这是一个重大的问题,也是领导科学要研究的一个很重要的课题。"对于领导人才的综合素质,钱学森也提出了总体的设想和具体的要求。从总体上看,"领导者要有两方面的素养:一个方面是方法,就是领导、决策的科学方法所需要的学识;另一个方面是胆略,就是指领导和决断的气魄、决心、胆识和眼光"。同时,领导干部需要有广博的知识,需要具备六个方面的综合素养:第一个方面是马克思主义哲学、科学社会主义和政治经济学;第二个方面理论联系实际;第三个方面是现代科学技术知识;第四个方面是文学艺术修养;第五个方面是军事知识;第六个方面是健康的身体。要使这些人成为帅才和将才。要使他们具备上述的综合素质,尤其要学会应用马克思主义的立场、观点、方法,结合具体实际,进行创造性的思维和创造性的工作。钱学森认为:"用周恩来同志的话,我想帅才就要'举重若轻',而落实工作又要'举轻若重'。我们的从定性到定量综合集成法或大成智慧工程,就要把众人的'举重若轻'和'举轻若重'结合统一起来;在定方针时居高远望,统揽全局,抓住关键;在制订行动计划时又注意到一切因素,重视细节。"

3．重点是培养广大青少年

广大青少年是祖国的未来，民族的希望，好像早晨八九点钟的太阳。钱学森认为，中国教育应当按照“面向现代化，面向世界，面向未来”和培养“有理想、有道德、有文化、有纪律”的社会主义新人的要求，用社会主义精神文明的内容培养出一代又一代的社会主义新人。这些人应当熟悉现代科学技术体系；熟悉马克思主义哲学；理、工、文、艺结合，有智慧；熟悉信息网络，善于用电子计算机处理知识。这些人 18 岁就应当达到硕士研究生毕业的水平，然后再深入造就，综合发展。这样的人应当算是全才。当然，要注意处理全与专的辩证统一的关系。培育英才骄世纪，中华雄立论风流。钱学森关于现代科学技术与人才培养的设想，是抓住了社会主义现代化建设网络系统中的主导系统。让我们在社会主义现代化建设的网络系统中，以科教兴国战略为指导，把科学技术与人才培养的事业推进到新的阶段，提高到新的水平，促进群星灿烂、人才辈出的可喜局面的出现，使社会主义祖国创造出新世纪的辉煌。

参考文献

1　简明不列颠百科全书．(第 4 卷)．北京：中国大百科全书出版社，1985．720～721
2　哲学百科全书．莫斯科：1964．562～563
3　毛泽东选集(第 1 卷)．北京：人民出版社，1991．309
4　钱学森．基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导．哲学研究，1989(10)：3，5
5　马克思恩格斯全集(第 42 卷)．北京：人民出版社，1979．128
6　马克思恩格斯全集(第 20 卷)．北京：人民出版社，1971．15，599，635～636
7　马克思恩格斯选集(第 4 卷)．北京：人民出版社，1995．246，344，347
8　列宁全集(第 25 卷)．北京：人民出版社，1988．43
9　列宁全集(第 55 卷)．北京：人民出版社，1990．137，201
10　钱学森．论技术科学．科学通报，1957(2)：98～103
11　钱学森．科学技术的组织管理工作．红旗，1963(22)：19～21
12　钱学森．九十年代科技发展与中国现代化系列讲座．长沙：湖南科学技术出版社，1991．15
13　马克思恩格斯选集(第 3 卷)．北京：人民出版社，1995．383
14　列宁选集(第 4 卷)．北京：人民出版社，1995．419
15　倪迅．尊重知识　尊重人才——江泽民关心重视知识分子纪事．光明日报，2001－06－28
16　江泽民．论科学技术．北京：中央文献出版社，2001．31～32
17　钱学森．在授奖仪式上的讲话．人民日报，1991－10－19(3)
18　中国现代科学家传记(第 1 卷)．北京：科学出版社，1991．780～791
19　钱学森，吴义生．社会主义现代化建设的科学和系统工程．北京：中共中央党校出版社，1987．53，59，107，108，111
20　钱学森．智慧与马克思主义哲学．哲学研究，1987(2)：5
21　中国科学技术培训中心编．迎接交叉科学的时代．北京：光明日报出版社，1986．4，5

22 王寿云,于景云,戴汝为,等.开放的复杂巨系统.杭州:浙江科学技术出版社,1996.274,276~278,280~281,291~293

23 钱学森,刘吉,杨沛霆,等.现代领导科学与艺术.北京:军事译文出版社,1985.13~16

24 邓小平文选(第3卷).北京:人民出版社,1993.35,110

作者简介:冯国瑞 1936年3月出生,江苏射阳人。1964年毕业于北京大学哲学系。现为北京大学哲学系教授、北京大学现代科学与哲学研究中心副主任。在北大哲学系任教三十多年来,先后开设马克思主义哲学原理、毛泽东哲学思想研究、信息科学与认识论、现代科学中的哲学问题等十多门课程。发表著作《系统论信息论控制论与马克思主义认识论》、《信息科学与认识论》,主编《科学技术革命与社会主义现代化建设》、主编(之一)《信息科学技术与当代社会》。合著《现代科学的哲学探索》、《辩证法研究》、《毛泽东哲学思想神髓》、《毛泽东与中国现代化》等十多部著作。发表论文《伟大的认识武器》、《现代科学应当以马克思主义哲学为指导》、《关于人工智能的认识论思考》、《〈实践论〉、〈矛盾论〉的理论地位与当今启示》、《开放复杂巨系统研究的哲学思考》、《中国系统科学研究的新进展》、《系统园地绽奇葩》等七十多篇。近十年来,获得国际学术会议奖励、全国学术会议奖励和省级、校级学术奖励多项。研究领域是现代科学与哲学、当代认识论、毛泽东哲学思想。

试论钱学森的“大成智慧学”

钱学敏

新世纪的晨光已照亮大地，可以预料，这将是高科技群体飞速发展和新的科技革命、社会革命相继到来的世纪；这将是又一次伟大的文艺复兴和大智大德的新人辈出的世纪。然而，前方的路依然坎坷，美好前景不是唾手可得；人类的未来、国家的昌盛比以往任何时候都更加依赖于人们对科学技术知识的掌握、运用与创新，依赖于有智慧的人。

如何尽快提高人们的智能，以适应新世纪发展的需要？这是钱老几十年来，尤其是近十年来，着力探索与思考的时代课题。他认为这是件大事，很重要。其意义甚至不亚于当年“两弹一星”的研制、发射。他所倡导的“大成智慧学”简要而通俗地说，就是引导人们如何尽快获得聪明才智与创新能力的学问。其目的在于使人们面对浩瀚的宇宙和奇妙的微观世界，面对新世纪各种飞速发展、变幻莫测而又错综复杂的事物时，能够迅速作出科学而明智的判断与决策，并能不断有所发现、有所创新。

“大成智慧学”与以往关于智慧或思维学说之不同，在于“大成智慧学”是以马克思主义的辩证唯物论为指导，利用现代信息网络、人—机结合以人为主的方式，集古今中外有关经验、知识、智慧之大成 。英译为：“Theory of metasynthetic wisdom utilizing information network structured with marxist theory”。

钱老有时也把“大成智慧学”英译为：“Science of wisdom in cyberspace”，把“大成智慧”英译为：“ Wisdom in cyberspace” [1]，借以强调“大成智慧”的特点是沉浸在广阔的信息空间里所形成的网络智慧。“大成智慧”是知识爆炸、信息如潮的时代所需要的新型的思维方式和思维体系。

“大成智慧”的核心是科学技术与哲学的结合。钱老曾说：“我想我们宣传的‘大成智慧’……既不只谈哲学，也不只谈科学；而是把哲学和科学技术统一结合起来。”[2]

“大成智慧学”的内容涉及广泛，探索得也很深了，但并不是神奇莫测、高不可及。要想成为“大成智慧者”，重要的不仅要利用人—机结合的思维体系，下苦功夫掌握广博的知识、经验、信息，还要从实际出发，实事求是，善于思考，反复实践，努力树立起反映新世纪的世界观、人生观、科学观和方法论。

---

[1] 钱学森 1995 年 3 月 23 日给钱学敏的信。

[2] 钱学森 1997 年 4 月 6 日给钱学敏的信。

一、“大成智慧学”提出的时代背景和社会条件
——当代科技、经济发展与“世界社会形态”

21世纪是一个需要“大成智慧”并且产生“大成智慧”的时代。“大成智慧学”的提出不是“空论”，也不是“吹牛”，而是历史的必然、时代的使命。

(一)新世纪的呼唤

“大成智慧学”是新世纪的需要。回顾过去，展望未来，随着科学技术的发展与革命，必将引起经济的社会形态，主要是社会生产体系的变革与飞跃，以至推动社会制度的转变和社会形态的变迁，这就是产业革命。按照这样的社会发展观来看，在人类历史上，从火与铁的发现与使用开始，我们已走过了畜牧业 、农业、手工业以至机器制造、电力应用等为主的第一、二、三、四次产业革命时期，经历了原始社会、奴隶社会、封建社会、资本主义社会等多种社会形态的兴衰变迁。目前，我们正面临的是第五次产业革命时期。

第五次产业革命大约从第二次世界大战以后至今，是以相对论、量子力学等科学革命为先导，一大批高新技术(核、激光、航天、新材料、生物工程等)为动力的微电子信息技术革命。与21世纪相继到来的还有以细胞、基因、微生物、酶等科技成果为代表的生物科学与生物工程技术(包括农业科学技术)的大发展，和以人体科学(医学)、生命科学等学科为主导，带动各种科学技术飞速发展的第六次和第七次产业革命。

第五次产业革命的浪潮，推动了世界经济的飞速发展，虽然也有暂时的经济衰退，但国际市场日益扩大，国际分工越来越细，世界经济日趋全球化。世界正在向多极化发展，并且逐渐形成一个互相联系、难以分割的大社会，这个大社会是一个包括各种不同国家政体、不同经济发展状况、不同意识形态为主导、不同种族、不同文化，而且打破地区界限、各国相互关联的大社会。钱老称之为“世界社会形态”[1]。这将是继资本主义社会形态发展之后，人类向(社会主义)共产主义过渡并开创世界大同的社会形态。

在这“世界社会形态”形成的时期，哪个国家要想发展，都不能闭关自守。各国之间既相互依存又有矛盾和斗争。目前这场以“和平、友好、互利”形式出现的经济实力的竞争和以经济实力为基础的各国综合国力的较量，归根结底是一场“科技战”、“智力战”、“人才战”。1986年钱老曾说：“如果下一个世纪科学技术在一个国家中不居领先位置，它的整个经济活动、国际地位就很难保住。”[2]

而高科技是各国争夺的制高点。那么，怎样才能抢占这个制高点？当然是要有一大批高智慧的人才，尤其是帅才、将才。第五次产业革命“对人民提出这样高而广泛的智力和知识的要求，是人类历史上前所未有的，可以说是人类社会发展的一次重大变革。”[3] 这

---

[1] 钱学森1993年2月16日和3月4日给钱学敏的两封信。

[2] 钱学森《从世界经济发展的总特点看当前我国的改革》，中共中央党校《理论动态》，1986年12月30日。

[3] 钱学森《评“第四次世界工业革命”》，《世界经济导报》1983年10月10日。

是新世纪对“大成智慧”的呼唤。

(二)新世纪的骄子

第五次产业革命为形成“大成智慧”创造了条件。如果说以往,特别是18世纪下半叶开始以蒸汽机技术革命为先导的第三次产业革命,推动了以机器为基础的近代工业的兴起,开创了人—机结合的物质生产体系;那么,第五次产业革命,由于高科技的迅猛发展,特别是微电子信息技术革命带来的电子计算机、多媒体、灵境技术(Virtual reality)、信息网络等技术和设备的使用与普及,不仅开创了新一代人—机结合的物质生产体系,正在改变着人们的生产方式、管理方式、工作方式,进一步扩大与提高了社会的物质生产力;而且开创了新型的人—机结合的知识生产体系,正在改变着人们的思维方式、学习方式以至传统观念,形成一种无可估量的精神生产力。这两种生产力的互相促进,将使人们的精神与智能迸发出无限的力量。

这是由于20世纪中叶以来,飞速发展起来的这些微电子信息技术与设备的普及,使得人们在信息的获取、传输、存储、检索、处理以至利用信息技术进行组织、协调、控制、决策等方面都发生了效率空前的变化。通过互联网,人就与整个世界联在了一起,将来“数字化地球”建设起来,利用全球和卫星上各种信息资源将更加便捷。从而,人们的思维空间将大大拓展。

信息技术革命也使得人们对客观世界认识的深度前所未有,高速计算机和灵境技术等为进行高难度的科学研究提供了崭新的研究方法。使科学家有可能走进虚拟世界,“飞人”太空,巡游在宇宙天体之间,或“深入”微观世界,调动分子、原子,或“进入”人体,手术、会诊等等,皆如身临其境。

特别是大型高速计算机对于巨大而复杂的工程设计、控制试验进程、数据计算与处理等方面的大量工作,其运作的速度与精确度是人脑难以企及的。因此它能把人们从记忆、计算等繁重的脑力劳动中解放出来,“把智慧集中到整理全人类的知识。全面考察,融会贯通,从而能够创作更多更高的脑力劳动的成果,也就是人变得更聪明了,人类前进的步伐将会更快了。”[1]

钱老说:“信息革命的一个与前几次产业革命不同之处似在于直接提高人的智能。”[2]一切聪明而智慧的人,所有的大成智慧者,将是新时代的主人、新世纪的骄子。那将是“新的人类”、“新的社会”。

---

[1] 钱学森《情报资料、图书、文献和档案工作的现代化及其影响》,《科技情报工作》,1979年第7期。

[2] 钱学森1996年5月12日给黄顺基的信。

二、大成智慧学构成的科学基础和知识源泉
——现代科学技术发展的特点与体系结构

"必集大成,才能得智慧!"[1] 而我们"集"的对象,主要就是现代科学技术体系中所包含的知识以及体系外围的经验、感受。因此,几千年来人类灿烂的文化艺术和日新月异的现代科学技术知识,是大成智慧学的科学基础和知识源泉。

(一)现代科学技术体系

认清现代科学技术发展的特点及其体系结构,树立现代科学技术体系观(大科学观),是有效地"集大成,得智慧"的关键。20 世纪是人类历史上科学技术空前发展和灿烂辉煌的时期。一大批交叉学科、边缘学科蓬勃兴起,现代科学技术愈分愈细,门类繁多。加之信息技术革命的发展,人们对世界认识的范围日益广阔,层次更为深入。与此同时,各学科相互渗透、相互耦合的整体化趋势也愈益增强。

20 世纪 80 年代初,钱老指出:"现代科学技术不单是研究一个个的事物、一个个现象,而是研究这些事物、现象发展变化的过程,研究这些事物相互之间的关系。今天,现代科学技术已经发展成为一个很严密的综合起来的体系,这是现代科学技术的一个重要的特点。"[2] 因此,"要进行社会主义建设,改造客观世界,就必须运用人类通过实践认识客观世界所积累的知识,而其中一个重要组成部分就是现代科学技术的整个体系。"[3]

十几年来,钱老认真总结了现代科学技术和文学艺术发展的成就与趋势,从系统观的角度揭示了现代科学技术发展的整体状况,建立起一个开放复杂的"现代科学技术体系"。这个体系包括所有通过人类实践认知的学问。目前暂分为 11 个大部门:自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、军事科学、行为科学、地理科学、建筑科学以及文艺理论等。"这是个活的体系,是在全人类不断认识并改造客观世界的活动中发展变化的体系"[4]。随着社会的发展、科学的进步,这个体系不仅结构在发展,内容也在充实,还会不断有新的科学部门涌现。

这种科学分类法是从人们研究问题的着眼点或看问题的角度之不同,来区分各科学门类的。而各门科学所研究的对象其实都是统一的、同一的,即整个客观世界(包括自然、社会、人和人化自然等),这是各门科学技术知识相互渗透、相互借鉴、相互统一的客观基础。

这种科学分类法,突破了 18 世纪林耐(Linnaeus)按动物、植物、矿物等的构造或外部特征的人为分类法;扩展了 19 世纪恩格斯按照物质运动形式区分自然科学各门类的方法;

---

[1] 钱学森 1997 年 4 月 6 日给钱学敏的信。

[2] 钱学森主编《现代科学技术和科学政策》,中共中央党校出版社,1993 年版,第 80 页。

[3] 钱学森《现代科学技术的特点和体系结构》,钱学森等著《论系统工程》,湖南科学技术出版社,1988 年 10 月第 2 版,第 513 页。

[4] 钱学森讲《社会主义现代化建设的科学和系统工程》,中共中央党校出版社,1987 年版,第 135 页。

深化了毛泽东关于矛盾特殊性是科学研究领域划分根据的思想。

这种科学分类法,从各学科的横向结构上拆除了使以往各门科学技术之间隔行如隔山的那种仿佛永远不可逾越的鸿沟,显示出各门科学之间原本就相互贯通、相互促进、统一而又不可分割的动态网络关系。为广开知识之源,进行大跨度的思维,敞开了绿色通道。

钱老曾说:"跨度越大,创新程度也越大。而这里的障碍是人们习惯中的部门分割、分隔、打不通。而大成智慧学却教我们总揽全局,洞察关系,所以促使我们突破障碍,从而做到大跨度的触类旁通,完成创新。"❶ 这是现代科学技术体系观对集成智慧的重要启示之一。

(二)科学技术三层次

在现代科学技术体系的纵向结构上,每一个科学技术部门都按照是直接改造客观世界,还是比较间接地联系改造客观世界的原则区分为:基础科学、技术科学、工程技术三个层次(文艺理论的层次划分略有不同)。三个层次之间是相互关联的。

基础科学,是综合提炼具体学科领域内各种现象的性质和较为普遍的原理、原则、规律等而形成的基本理论。其研究侧重在认识世界过程中,进行新探索、获得新知识、发现新规律,形成更为深刻的理论。它是技术科学、工程技术发展的先导,也是衡量一个国家科技水平与实力的重要标志。

技术科学,是20世纪初至第二次世界大战前,在科学与技术之间涌现出的一个中间层次。它侧重揭示现象的机制、层次、关系等的实质,并提炼工程技术中普遍适用的原则、规律和方法。主要是如何将基础科学准确、便捷地应用于工程实施的学问。它是科学技术转化为社会生产力的关键。

工程技术,侧重将基础科学和技术科学知识应用于实践活动,并在具体的工程实践中,总结经验、创造新技术、新方法,使科学技术迅速成为社会生产力的学问。工程技术的发展,也必将丰富、完善技术科学、基础科学,它是技术科学、基础科学发展的根本动力。

科学技术三个层次之间的关系与影响是双向的、统一的。钱 老曾说:"人首先要认识客观世界,才能进而改造客观世界。从这一基本观点出发认识客观世界的学问就是科学,包括自然科学、社会科学等等。""改造客观世界的学问是技术。"而人们在认识世界和改造世界的过程中,主体与客体、认识与实践是相互作用、辩证统一的。所以,钱老赋予现代"科学"与"技术"的涵义,实际上也体现了科学技术相互补充、相互促进的内在统一关系。例如,在自然科学部门中,物理学属基础科学;应用力学、电子学属技术科学;航空航天工程、电力工程属工程技术。但这三个层次之间又是相互渗透、相互促进的。

科学技术三层次的区分,便于我们自觉地将理论联系实际,促进生产力发展。也便于

❶钱学森1994年2月13日给钱学敏的信。

我们迅速明确某个学问在整个现代科学技术体系中的地位和作用,易于找到薄弱层次和新的科技生长点,打开局面,集中人力、物力去研究、去探索。在培养有高度智慧的人才时,也与科学技术三层次密切相关。20多年前,钱老根据自己当时熟悉的科技领域,建议在国防科技大学所设置的八个系的专业就是出于把基础理论、技术科学、工程技术统一起来的考虑。它们是:一系——力学与应用力学;二系——核物理与物理工程;三系——控制论与控制工程;四系——电子学与电子工程;五系——化学与应用化学;六系——计算机理论与工程;七系——数学与系统工程;八系——仪器与仪器设计。

1991年秋,面对国际间的激烈竞争,钱老关于尽快在我国建立科学技术业向中央的建议,也是将科学技术三个层次(各种科研院所—各种科技专业开发公司—各种综合系统设计中心)紧密组织起来成为一条龙,有效地转变成生产力的构想。[1]

要想在"科教兴国"的战略实施过程中出智慧、出成果、出人才,就不仅要多学科知识的综合集成,还要注意将科学技术三个层次的知识与经验紧密结合起来。这是现代科学技术体系观对集成智慧的重要启示之二。

(三)科学技术与哲学

在现代科学技术体系各科学技术部门三个层次之上,还有一个层次就是各学科的哲学概括。这是通向整个体系的最高概括——马克思主义哲学(辩证唯物主义)的桥梁。它们是:自然科学的自然辩证法;社会科学的历史唯物论;数学科学的数学哲学;系统科学的系统论;思维科学的认识论;人体科学的人天观;军事科学的军事哲学;行为科学的人学;地理科学的地理哲学;建筑科学的建筑哲学;文艺理论的美学。这11架桥梁共同构成马克思主义哲学的主要内容和科学基础。各门科学技术通过各自的桥梁,在哲学的层次上,也最易找到共同点、结合点,从而相互融通,相互促进。

"把马克思主义哲学放在科学技术整个体系的最高层次,也说明了马克思主义哲学的实质:它决不是独立于现代科学技术之外的,它是和现代科学技术紧密相连的。也可以说,马克思主义哲学就是全部科学技术的科学,马克思主义哲学的对象就是全部科学技术。"[2]

就此而论,今天马克思主义哲学的涵义应有新的扩展,它不应仅仅是自然科学与社会科学的概括和总结了。钱老提出:"马克思主义哲学,辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括"[3],马克思主义哲学"也是人的一切实践的概括"[4]。早在1978年钱老就强调:"哲学作为科学技术的最高概括,它是扎根于科学技术中的,是以人的社会实践为基础的;哲

---

[1] 钱学森《我们要用现代科学技术建设有中国特色的社会主义》,见《九十年代科技发展与中国现代化》,湖南科技出版社,1991年版,第21页。

[2] 钱学森等《论系统工程》,湖南科技出版社,1988年版,第528页。

[3] 钱学森《正确对待祖国历史文化传统,认真学习马克思主义哲学》,《自然辩证法》,1988年第2期。

[4] 钱学森1994年1月9日给钱学敏的信。

学不能反对、也不能否定科学技术的发展，只能因科学技术的发展而发展”[1]。而发展深化马克思主义哲学应先着眼于那11架桥梁，然后再考虑上升到马克思主义哲学本身。

马克思主义哲学(辩证唯物主义)作为人认识客观和主观世界的学问，它的世界观、方法论，对各门科学技术体系的建构与发展的指导作用是很明显的。钱老从1955年回国以后，几十年来一直强调科学家要掌握科学的哲学，他说：“一个科学家，他首先必须有一个科学的人生观、宇宙观，必须掌握一个研究科学的科学方法！这样，他才能在任何时候都不致迷失道路；这样，他在科学研究上的一切辛勤劳动，才不会白费，才能真正对人类、对自己的祖国作出有益的贡献。”[2]

各门科学技术作为认识世界和改造世界的学问，其研究成果对辩证唯物主义哲学也会有着深刻的影响，从钱老的以下事例中可见一斑。

他根据当前物理学、天文学、数学、化学、地质学、生物学等数学科学和自然科学发展的成就，在人们观察和研究宇宙时惯用的“宇观”、“宏观”、“微观”之外，又提出“胀观”与“渺观”。为从各个层次上研究和认识客观物质世界打开了通道。这个统一而多层次的宇宙观，为唯物主义的世界观作了更为深入的科学论证。

他关于科技革命必然引起产业革命与社会革命乃至文化革命的社会历史观、关于现代中国的三次社会革命论、以及关于世界社会形态等理论，从社会科学的角度为唯物史观增添了新的内容。

他倡导的系统科学，是从普遍存在于客观世界的各种系统的结构、层次、功能、性质等侧面去研究整个客观世界的；特别是开放复杂巨系统的理论与方法，是对唯物辩证法的丰富与发展。

他倡导的思维科学，是研究人脑通过思维活动，怎样处理从客观世界获得的信息的科学，侧重于研究如何利用计算机、信息网络等设备与技术，人—机结合以得到正确的认识和改造世界的知识，并进行创造性思维的科学，因而，使得辩证唯物主义认识论具有新时代的特征。

由此可见，我们不仅需要接受马克思主义哲学的指导，而且应看到，各门科学技术的发展对马克思主义哲学(辩证唯物主义)基本原理与方法的补充、更新、发展有着极为重要的作用。科学高峰离不开理论思维，在新的世纪里，科学与哲学将更加相互交融、相辅而行。这是现代科学技术体系观，对集成智慧的重要启示之三。

在这个现代科学技术体系的外围，还有大量一时还不能纳入体系中的古往今来人们对世界的探索、认知、初步的哲学思考以及点滴的实践经验、不成文的实际感受、灵感、潜意识等等，这些暂属于前科学的知识库。通过人们主动地在实践中反复比较、鉴别、分析、综合，逐渐将其中有价值的东西提升到理性认识，纳入到现代科学技术体系中，使之不断

---

[1] 钱学森《科学学、科学技术体系学、马克思主义哲学》，《哲学研究》，1979年第1期。

[2] 转引自洛翼：《一个有思想的科学家——钱学森博士访问记》，《中国新闻》，1956年3月2日。

丰富与发展。人们认识与实践的历史长河,永不停息。

现代科学技术体系及其外围前科学的知识库,包括了古今中外人类在实践中认知的全部学问、知识、经验、信息、智慧,是集大成过程中“集”的对象与内容,也是大成智慧学的科学文化基础和知识源泉。努力利用现代科学技术体系,特别是其外围的前科学知识库去综合集成,会通经验—科学—哲学,“大成智慧”才能不断集成出新,不至成为无源之水、涸辙之鲋。这是现代科学技术体系观对集成智慧最重要的启示。

现代科学技术体系及其外围的点滴感受和经验,是人类现在所认识到的关于客观世界知识的全部精华,因而其最高概括——马克思主义哲学也应该是人类智慧的结晶。哲学(Philosophy)古希腊文为“爱智慧”的意思。所以,“大成智慧是古老的‘爱、智、慧’概念的更进一步,更具体了。”[1] 或许可以这样理解,“大成智慧学”赋予马克思主义哲学以新内涵、新基础、新概念;是对马克思主义哲学的丰富、发展与深化;也是对新世纪科学的哲学体系建构与发展的伟大尝试。

三、大成智慧学的理论基础与方法论

——开放的复杂巨系统理论与大成智慧工程

现代科学技术发展的各项成果及其体系结构是“集大成 得智慧”无尽的知识源泉。但是,要想真正有效地获得解决复杂性难题的智慧与决策以至有所创新,还需要进一步掌握新的科学观与科学方法,特别是开放的复杂巨系统的系统观,以及“大成智慧工程”等,这些是大成智慧学的理论基础与方法论。

(一)开放的复杂巨系统

复杂性问题的研究是当今科学研究的前沿和焦点,是一个科学新领域,将引起一次新的科学革命,它与能否获得“大成智慧”密切相关。多年来,国外也有一些著名科学家开始注意探索复杂性问题,例如1984年,美国新墨西哥州的Santa Fe研究所,在诺贝尔奖金获得者M. Gell - Mann、P. Anderson、K. Arrow等人的支持下,聚集了一批数学、物理、经济、生物、计算机等学科的研究人员,专门从事复杂性科学的研究,试图从多学科的交叉研究中克服还原论的不足,找到一条解决复杂性问题的道路。目前,他们有些成果值得我们借鉴,但是,从总的思路上和方法上来看,他们似乎尚无明显的突破。有人说他们仿佛是从“复杂”走向了“困惑”[2]。

钱老倡导的系统科学原本就包含着对各种复杂性问题的研究与解决。1978年他在《组织管理的技术——系统工程》一文中,就明确提出“我们把极其复杂的研制对象称为‘系统’”。[3] 此后,他一直带领大家努力探索复杂系统的理论与方法。他继承和发扬了中

---

[1] 钱学森1995年2月2日给钱学敏的信。

[2] 参见《From Complexity to Perhlexity》,《Scientific American》,1995年6月

[3] 钱学森等《论系统工程》,湖南科技出版社,1988年版,第10页。

国传统文化的精华和国外的先进科学技术成果，认真总结了组织“两弹一星”研制、发射等复杂系统工程的经验，以及社会主义建设过程中，各种巨大的复杂系统工程实践，于20世纪80年代末，提出了开放的复杂巨系统的概念、理论及其方法论。发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》[1]、《再谈开放的复杂巨系统》[2]、《开创复杂巨系统的科学与技术》[3] 等一批文章和书信[4]，使系统科学有了实质性的重大进展。

什么是开放的复杂巨系统？所谓系统，按照钱老的看法，就是指“由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，”[5] 而且这个‘系统’本身又是它所属的一个更大系统的组成部分。开放的复杂巨系统（Open complex giant system）指的是，系统本身与系统周围的环境有物质、能量、信息等的交换，因而是“开放的”。系统所包含的子系统很多，成千上万，甚至上亿万，所以是“巨系统”。巨系统内子系统的种类繁多，有几十、上百、甚至几百种，每个子系统既参与整个系统的行为活动，又受整个系统和环境的影响，形成复杂的相互作用，高度非线性。并且有许多层次结构，各层次结构之间的关系也很复杂，以致有些层次及层次间的关系、结构都还不清楚，没有被认识。例如，人脑系统、人体系统、社会系统、地理系统（包括生态系统）、星系系统以及目前与互联网有关的种种复杂系统等，都是开放的复杂巨系统。

开放的复杂巨系统的存在是相当普遍的。从发展上来看，一切事物和人都有其自身发展的历史。世界上万事万物和人自己的组成、结构、特性、动因等等，在悠久的时间“隧道”中，历尽沧桑，往往是沿着由低级到高级、由简单到复杂螺旋式上升的轨迹不断发展变化的，其结构、层次、组成等又兼具确定性与随机性，有序性与无序性等，因此，今天的各种事物和人自身都是相当复杂的系统。

再从其相互关系上来看，各种事物和人本身在与周围其他事物和人的不同方面、不同层次，以不同方式相互影响、相互作用，并在进行物质、能量、信息等的交换过程中，还有可能呈现出新的因素、新的特点、新的机制，以至新的错综复杂的关系、新的质变。所以，开放的复杂巨系统颇为常见，钱老很早就指出：“在现代这样一个高度组织起来的社会里，复杂的系统几乎是无所不在的。”[6]

开放复杂巨系统的理论是系统科学理论的深化与升华，它对我们当前所生活的这个世界的实际情况，作了深入的揭示和具体的展开。因而它作为一种新的科学观，不仅是对辩证唯物主义世界观的补充与发展，打开了一个新的天地、新的领域；也便于我们对于周围各种事物和人的复杂情况作更清楚、更准确的了解，自觉地从这种实际出发，方方面面周密思考与调查，进而在解决各种复杂性问题的实践过程中，能够准确把握事物的本质及

---

[1] 钱学森等《论地理科学》，浙江教育出版社，1994年版，第94页。
[2] 钱学森等《论地理科学，浙江教育出版社，1994年版，第164页。
[3] 《中国系统工程学会情况简报》，1995年第4期。
[4] 王寿云等《开放的复杂巨系统》，浙江科技出版社，1996年版，第262页。
[5] 钱学森等《论系统工程》，湖南科技出版社，1988年版，第12页。
[6] 钱学森等《论系统工程》，湖南科技出版社，1988年版，第538～539页。

其规律，从而激发出聪明和智慧。

开放复杂巨系统的理论与研究方法，对于推动不同学科的理论发展是一种无形的动力，而且还为各学科的理论与方法互相融通、互相促进，开辟了新的途径。过去，各门具体科学只是从不同角度去研究整个客观世界中各种开放的复杂巨系统，如地理科学研究地理系统、社会科学研究社会系统、人体科学研究人体系统、信息科学研究因特网系统等，当走进科学的深处时，都自觉或不自觉地遇到复杂性问题，各自从本专业的角度，以本专业的概念揭示开放的复杂巨系统问题。

现在，开放复杂巨系统的理论与方法，虽然还需进一步丰富与完善，但已经可以使各门具体学科有一个共同的科学概念和切实可行的方法。这一事实，正在推动物理学、生物学、数学、经济学、建筑科学、工程技术、计算机信息技术等等各学科的沟通与融合，这也便于我们从复杂性的角度使资源共享，集纳现代科学技术体系中广博的知识，涌现出大成智慧。

(二)坚持整体论

对于客观世界中千姿百态、各种纷繁复杂的事物，如果我们从整体上来观察与思考，其实，复杂系统与简单系统之间往往是统一的，其区分是相对的，很难有严格的界限。但是，从我们具体的认识过程与研究方法来看，对于各种开放的复杂巨系统，我们为了及时地认清问题和正确地解决问题，实际工作的切入，时常需要注意抽取开放复杂巨系统中主要的、牵动着整体的、在一定范围和程度上对整体影响较大的一些系统，或与我们研究目的密切相关的某些部分、某些层次、某些侧面、某些因素等，将其暂时作为相对来说比较简单的系统去观察与处理。

这样做是根据实际情况进行科学的抽象(思维的抽象)而得到的，是深稽博考复杂系统的实情，晓然于是非得失之宜，主次取舍之要以后的思考，这是科学研究的经验总结。是有效而明智的、也是非常现实的认识方法、研究方法和工作方法。钱老说："客观事物和人自己都是开放的复杂巨系统，只是人在认识它们时，常常可以作为简单系统来处理，暂时避开复杂的一面。科学都是如此的。所以，不要以为我们非用复杂性不可。"❶

当然，对于研究和认识复杂事物和人等这些开放的复杂巨系统，整体观很重要。因为"系统就是由许多部分所组成的整体，所以系统的概念就是要强调整体，强调整体是由相互关联、相互制约的各个部分所组成的……系统工程就是从系统的认识出发，设计和实施一个整体，以求达到我们所希望得到的效果。"❷

需看到复杂系统的整体性质不等于各部分性质的简单加和，它往往会产生新的量与新的质。因为系统内部各子系统、各层次、各因素之间的相互联系、相互作用、相互激发是相当复杂的、非线性的，甚至还有一些偶然的、奇异的、模糊因素的影响，所以，整合起来的

---

❶钱学森1999年4月11日给钱学敏等四人的信。

❷钱学森等《论系统工程》，湖南科技出版社，1988年版，第534页。

系统性质与部分的性质会有很大区别。例如：能与水发生剧烈反应的金属钠(Na)和有毒气体氯(Cl)化合在一起，就成为餐桌上晶莹美味的食盐(NaCl)，其整体性质全新。

同时，复杂系统与简单系统往往是统一的，在根据客观事物和人自己的实际情况，运用科学的抽象(思维的抽象)，把某种开放的复杂巨系统暂时避开其复杂的一面，当作简单系统来分析、研究、处理时，要注意超越还原论的局限性。不要追求把开放的复杂巨系统简化到极点(那也是不可能的)，不要完全孤立、静止地去分析、研究，不要以简单系统的性质和运动规律去代替整个复杂系统的性质和运动规律。

坚持整体论，既要注意进行微观的考察，认真分析、研究相对简单系统的具体层次、结构、关系等的细节，使对整体的把握不致成为贫乏的抽象；又要有整体观，时刻不忘其与整个开放复杂巨系统、与环境、与时间、与其他系统等的相互联系与影响，把它们有机地、全面地、如实地结合起来，从宏观上把握，进而找到整体的性质与规律。钱老说："要从整体上考虑并解决问题"❶，这个"整体"就是开放的复杂巨系统，就是一个整体的世界。

(三)大成智慧工程

今天，整个世界通过世界经济市场和全球信息网络，把各个国家紧密地联在一起，多格局、多极化，斗争十分复杂。我们在进行物质文明与精神文明建设中，所面临的各种事物与人也是千头万绪、变化多端，形成各种开放的复杂巨系统。如何迅速获得大成智慧，正确地认识它、解决它，除了要有辩证唯物主义世界观、科学观，遵循认识的辩证法，还要适应和利用先进的信息技术、更新思维方式和工作方式，使我们的思维能力和智慧达到更高的层次。

钱老从当今世界社会形态、科技发展的新趋势、以往工程实践和社会改革的经验教训中，提炼出"从定性到定量综合集成法"，即"大成智慧工程"(Metasynthetic Engineering)作为认识和处理各种开放的复杂巨系统的方法，并把运用这个方法的集体称为"总体设计部"。

"从定性到定量综合集成法"与过去工程技术人员常用的"定性与定量相结合"的方法有相似之处，但也有很大的区别。从钱老 1992 年 3 月提出的"从定性到定量综合集成研讨厅体系"，可以清楚地看出，这种方法不是对某项工程进行简单的评估与核算，而是把下列成功的经验和科学技术成果汇总起来的升华："①几十年来世界学术讨论会(Seminar)的经验；②从定性到定量综合集成法；③ C^3I 及作战模拟；④情报信息技术；⑤人工智能；⑥灵境技术；⑦人—机结合的智能系统；⑧系统学；⑨"第五次产业革命"中的其他各种信息技术；⑩……❷"

可见，从定性到定量综合集成法的特点是面对复杂的难题时，要利用计算机、灵境技术、信息网络等现代信息技术，组成人—机结合的智能系统，以人为主，将所需要的古今中外有关知识、信息、数据，予以检索、激活、快速调集出来，启迪专家的心智，并通过民主讨

❶钱学森《要从整体上考虑并解决问题》，《人民日报》1990 年 12 月 31 日。

❷钱学森 1992 年 3 月 2 日给王寿云的信。王寿云等《开放的复杂巨系统》，浙江科技出版社，1996 年版，第 279 页。

论，让专家各抒己见，互相补充、互相激发，然后将各方面有关专家的理论、知识、经验、判断、建议等，综合集成起来，用类似"作战模拟"的方法，将解决方案模拟试行，反复修正，以便能对复杂性的事物(开放的复杂巨系统)发展变化的各子系统、各层次、各因素及其相互关系等，从定性到定量都能认识清楚，逐步集智慧之大成，找到解决问题的最佳方案。

通过研讨厅的工作，将各方面有关专家的群体智慧、数据和各种信息与计算机、人工智能技术、信息网络等有机地结合起来了，也把各种学科的科学理论、知识与难以言表的经验、直觉、灵感等结合起来了。因而这个方法可以充分发挥人的主观能动性、充分发挥现代科学技术体系及其外围的经验知识库的整体优势和综合优势。也可以说，"大成智慧工程"是"把人的思维、思维的成果、人的知识、智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来"❶，并把宏观与微观、科学与艺术、逻辑思维与形象思维结合起来，获得"大成智慧"。这样可以做到："在定方针时居高远望，统揽全局，抓住关键；在制定行动计划时又注意到一切因素，重视细节"❷，并能有所创新。所以，钱老把"从定性到定量综合集成法"又称为"大成智慧工程"。

(四)总体设计部

运用从定性到定量综合集成法(即大成智慧工程)的集体——总体设计部，是当今国家进行长远规划、解决各种开放复杂巨系统问题的决策咨询和参谋机构。从中央到地方、从军事到法律、从科技到文艺等不同层次、不同部门、不同系统，都可以设立自己的总体设计部。在全国、各系统形成上下左右相互关联的总体设计部网络体系，互相配合协同工作。

总体设计部作为领导部门的决策咨询机构，它应由德高望重、学识渊博、勇于开拓的总体设计师及各行各业具有团结、务实、创新精神的科技专家组成。总体设计部通过人—机结合的工作体系，运用计算机、灵境技术、信息网络等信息技术，使亿万人民群众的要求、建议、生活状况、生产进度、市场供需等各种信息，及时反馈到各层次、各部门、各系统的总体设计部，运用大成智慧工程，群策群力，将解决方案模拟建模，反复分析综合，使智慧不断集成出新，形成切实有利于人民、有利于生产、有利于国家现代化建设的路线、方针、政策、措施，供领导机构决策参考。

高新技术的设计开发与产业化，也需要运用总体设计部和大成智慧工程进行总体规划、总体设计、分部实施、总体协调。同时利用计算机、多媒体、信息网络、灵境、遥作(Telescience)等设备和技术，组成人—机结合的智能工作体系，以人为主，从定性到定量严格、准确地综合集成起来，反复实验、修正，逐步达到整体成功。

总体设计部还要随着客观形势和人民需求的变化，不断根据新的反馈信息、新的复杂性问题的出现，对已订方针、政策进行不断调整、修订、补充。钱老于 1997 年 1 月曾这样

---

❶钱学森 1992 年 11 月 13 日与王寿云等六人的谈话。

❷钱学森 1993 年 9 月 16 日给王寿云等六人的信。王寿云等《开放的复杂巨系统》，浙江科技出版社，1996 年版，第 291 页。

强调:

"关于开放的复杂巨系统,由于其开放性和复杂性,我们不能用还原论的办法来处理它,不能像经典统计物理以及由此派生的处理开放的简单巨系统的方法那样来处理,我们必须用依靠宏观观察,只求解决一定时期的发展变化的方法。所以任何一次解答都不可能是一劳永逸的,它只能管一定的时期。过一段时间,宏观情况变了,巨系统成员本身也会有其变化,具体的计算参量及其相互关系都会有变化。因此对开放的复杂巨系统,只能作比较短期的预测计算,过了一定时期,要根据新的宏观观察,对方法作新的调整。"❶ 由于各种开放复杂巨系统有其不同的特征和演化速度,所以一次综合集成模型的有效时间也差别很大,如人体病变,有时仅一两天,生态地理环境的恶化,有的需要几年,甚至几十年,但都需要及时注意观察,不断调整,防微虑远。

实践证明,总体设计部可以使得各部门、各系统、各层次的领导集体,在管理国家、社会、大型工程、大型企业以及各行各业进行宏观调控时,能够更有效地发挥民主集中制的效力,决策更为科学化、民主化。在我们面对各种极为复杂而棘手的问题时,最便于集思广益,集腋成裘,及时获得大成智慧,找到正确、有效、机动、灵活的方法和对策。使整个社会协调、有序、可持续地发展。

"复杂性"实际是开放复杂巨系统的动力学,是非常现实、非常重要的问题,钱老在1990年就指出:"复杂性的问题,现在要特别地重视。因为我们讲国家的建设,社会的建设,都是复杂的问题。再说人这个问题不搞清楚,医疗卫生怎么解决? 所以我觉得,我们现在要重视复杂性的问题。而且我们要看到解决这些问题,科学技术就将会有一个很大很大的发展。我们要跳出从几个世纪以前开始的一些科学研究方法的局限性。我们既反对唯心主义,也反对机械唯物论。我们是辩证唯物主义者。"❷

年已九旬的钱老,和他年轻时一样,仍然是那样深深地热爱着自己的祖国和人民,并为之奉献着一切智慧和精力。"大成智慧学"的研究与探索,是他心中的一件大事,也是他晚年的一个重大贡献。钱老渴望祖国日益强大,也愿世界人民幸福。新千年的早春,他满怀豪情与期待地说:"我想我们人民中国就该创新大成智慧,为世界做好事!"❸

作者简介:钱学敏　女,1933年出生,祖籍浙江杭州。中国人民大学教授。

---

❶钱学森《在香山会议上的书面发言》,1997年1月6日。

❷钱学森《要从整体上考虑并解决问题》,《人民日报》1990年12月31日。

❸钱学森2000年3月18日给钱学敏的信。

永生难忘的教诲

钱振业

一、引 言

当代中国航天事业的发展,取得了举世瞩目的成就,作为中国航天事业开拓者和奠基人的钱学森院士,在毛泽东主席、周恩来总理和聂荣臻元帅等老一辈无产阶级革命家的直接领导下,率领广大航天人,发扬“自力更生、艰苦奋斗、大力协同、无私奉献、严谨务实、勇攀高峰”的航天精神,白手起家,从无到有,战胜了种种困难,攻克了重重难关,在社会主义现代化建设的高科技领域中创造了辉煌的业绩。他为中国航天事业的创立和发展做出了重大的贡献。他的献身精神、科学理论与实践结合以及在技术决策中发扬民主的作风成为航天人的楷模,是广大科技工作者的榜样。

在钱老九十华诞之际,谨将我经历中难以忘怀的几件事记述如下,以表敬意。

二、教书育人的导师

1957 年 9 月我从北京航空学院飞机设计专业毕业后,便被分配到国防部第五研究院。报到后首要任务是参加为期 3 个月的集训:听钱老讲导弹概论课,受保密教育和军训。

早就听说钱老不顾美国政府的迫害,于新中国成立后便毅然回国效力,能听他讲课我们感到非常兴奋。而在钱老一个月的授课中,吸引我们的不仅是他那传奇般的经历,更多的是钱老以深入浅出的方法传授给我们导弹的基础知识。学习虽然紧张,但钱老讲课时的精辟论述,使我们每堂课都能学到丰富的导弹基本知识,为我们在以后的学习和工作中奠定了导弹理论基础。正是通过钱老的讲课,将我们这批刚毕业,从来没有接触过导弹知识(当时在我国大学中尚未设导弹专业)的学生,领进到发展我国航天事业大军的行列中来。

在听课过程中,最使我永生难忘的是他在人生观问题上对我们的教育。钱老对我们谈起他在美国的经历时说:“我从 1935 年去美国,1955 年回国,在美国待了 20 年。20 年中,前三四年是学习,后十几年是工作,所有这一切都在做准备,为了回到祖国后能为人民做点事。我在美国那么长时间,从来没想过这一辈子要在那里待下去。我这么说是有根据的。因为在美国,一个人参加工作,总要把他的一部分收入存入保险公司,以备晚年退休之后用。在美国期间,有人好几次问我存了保险金没有,我说一块美元也不存,他们感到很奇怪。其实没什么奇怪的。因为我是中国人,根本不打算在美国住一辈子。”钱老还

语重心长地对我们讲:“从事导弹事业的工作者,要有毕生为国家献身的精神,要有做一辈子‘无名英雄’的信念”。我听到这番话,一股责任感和自豪感油然而生。是钱老以他爱国者的言行,使我明确了人生的价值。钱老的话语虽然简洁,却奠定了我为中国的航天事业奉献终身的决心,成为我四十余年在航天事业奋斗的座右铭。

三、实事求是、尊重实践的榜样

1960 年,中国航天事业的发展处于关键时期。仿制型号任务尚未结束,苏联专家已全部撤离。中国导弹事业如何发展?导弹自行研制如何起步?一个又一个紧迫的问题摆在了刚成立不久的国防部第五研究院的决策者面前。

当时的情况是:刚刚组建,从没有搞过导弹设计的总体设计部,从 1959 年开始进行中程导弹探索性研究,提出一种采用全新技术的方案,自行研制液氧/煤油火箭发动机,弹体直径为 2 000mm,射程为 2 000km。时至 1960 年春,研制工作仍没有取得很大进展。

同时总体部又根据仿制过程对导弹试制的认识,提出充分利用已有的工艺技术和工艺装备,在继承的基础上发展,采取改进、爬高的技术途径。这样做可缩短研制周期,又可降低风险。可是,尽管总体设计是在仿制型号的基础上进行的,采用将液氧箱由双层结构改为单层结构、尾段由钢结构改为铝合金结构,将火箭发动机的推力从 37t 提高到 45t,起飞质量从 21t 增加到 30t,使射程从 570km 提高到 1 200km。

在没有自行研制经验的前提下,中国弹道式导弹如何起步?面对这一情况,作为技术决策者的钱老积极支持后一种方案,经党组讨论后,由王秉璋副院长向周恩来总理报告。

1960 年 6 月初,周总理批准研制射程为 1 200km 导弹所采取的技术途径,并要求以最快的速度,开始研制中国自行设计的弹道式导弹,以满足国防的需要,并命名为“东风 2 号”。

1960 年 8 月,国防部第五研究院召开了“东风 2 号”导弹总体方案评审会。经与会领导和专家讨论,一致赞同由总体设计部提出的方案。钱老在总结中首先肯定了总体部在很短的时间内完成总体方案设计,对参加设计的同志们的工作热情和干劲予以肯定。同时也指出:自行设计导弹这在我国还是第一次。我们虽有仿制型号的经验,但还要通过实践,去探索型号研制的规律,积累经验,闯出一条独立自主发展中国导弹事业的新路。

从此,钱老率领一支由老专家和刚毕业的年青人相结合的科技队伍,大胆地进行探索研究,在 1964 年,“东风 2 号”导弹飞行试验获得成功。在此基础上,钱老总结自行研制的规律,遵循研制程序,充分做好地面试验,加强总体设计部的抓总协调工作,把型号研制的经验上升为现代管理科学——系统工程。在中央专委周总理的直接领导下,国防部第五研究院制订了“八年四弹”规划。报请中央专委得到批准,从而开始了我国自行研制导弹武器的长征。

1964 年 10 月 16 日,中国成功地在西部地区进行首次原子弹爆炸试验,并大获成功。

1965年春,党中央、国务院提出将原子弹装在导弹上进行"两弹结合"试验的任务。在本国大地上进行导弹核武器试验可谓举世无双,日期定在1966年进行,要求只能成功,不能失败。为此选择由我国自行研制,已飞行试验成功的"东风2号"导弹作为"两弹结合"试验的运载器。

由于"东风2号"导弹的战斗部是按照装TNT炸药设计的,其外形采用抛物线形。根据原子弹研制单位为满足核装置安装而提出:原战斗部的外形和容积不能满足安装要求,需要改变战斗部外形,增大容积。这在技术上没有困难,但要改变导弹战斗部的外形,会影响导弹总体方案。要重新进行总体方案设计,而研制周期不允许,如何解决这一难题?

为此,钱老提出由总体部研究改变导弹战斗部外形的方案,既要满足核装置安装要求,又必须保证进度要求。

我们接到任务后,深感时间紧、任务重。由于导弹的战斗部外形影响全弹的空气动力,因而,要改变战斗部外形,就需要重新进行总体设计(气动力设计、弹道设汁、载荷设计、稳定系统设计),还要对外形进行风洞试验,等于重来一遍型号研制程序的全过程。而不仅要在一年的时间内完成总体设计和各系统设计、试制生产,为保证可靠性,还要进行飞行试验。这一切要在1966年"两弹结合"试验前完成,从时间上讲是无法实现的。

为解决这一难题,我们认真研究能否在不改变战斗部外形的条件下,满足核装置安装要求的可行性方案。经过精心设计和模装使核装置成功地装入原战斗部,且与战斗部壳体与核装置之间尚有10mm的间隙。经双方协调,认定可以满足核装置安装的要求,从而提出不要改变导弹战斗部外形的建议。钱老听取汇报之后,完全支持我们所提出的方案。这就为两弹结合试验顺利进行创造了条件。

1966年10月27日,我国成功地进行了在本国国土上进行的导弹核武器试验,准确命中目标,实现核爆炸。这一成就,引起世界轰动,我们圆满地完成了党和国家交给的历史重任。

在毛主席提出"要大力协同" 思想的指引下,在中央专委、国防科委的领导下,中国导弹的研制工作,得到了全国各行各业的大力支持,再加上航天人的拼搏奋斗,终于闯出一条独立自主的发展道路,并取得辉煌的成就,为社会主义国防现代化建设做出贡献。

钱老在技术决策中始终坚持从实际出发、实事求是、尊重实践的态度,为航天人树立了光辉的榜样。

四、发扬技术民主的楷模

钱老在决定技术方案时,总是充分听取各方面看法,从不轻易否决少数人的意见。

1996年7月16日,钱老在给中国航天工业总公司刘纪原总经理的一封信中写到:

"您7月8日来信收到。您信中说今年10月将是我国航天事业创建40周年,并嘱我为此写几句话。现在回想起来,最重要的实在只一句话:我们航天事业的科技人员在周恩来

总理和聂荣臻元帅的领导下,贯彻了民主集中制。我们今后仍必须坚持民主集中制。"

从这短短几句语重心长的话语中,反映出钱老在技术决策中的指导思想。

在中国航天事业发展过程中,正因为能够充分听取各种不同的意见(不管这种意见是来自老专家还是年轻的科技人员),经过充分讨论研究后做出决策,从而保证了中国航天事业健康、顺利地发展。

在这个问题上有两件事我至今仍记忆犹新,并深受教育。首先是 1965 年夏天,在决策"东风 2 号"甲导弹的试车方案时发生的一件事。

"东风 2 号"甲导弹是"东风 2 号"导弹的改进型号。主要改进的项目有:为提高射程,将发动机推力提高 12.35%;将控制系统由惯性—无线制导改为全惯性制导,以及为改进使用性能,将原发动机推力调节器的标准气源压力由减压器出口压力提供,改为由恒压气瓶供给。

如何在飞行试验前对导弹在地面进行全弹试车? 总体设计部为充分做好地面试验,保证不带"问题"上天 ,经研究后提出进行两次全弹试车方案,向钱老进行汇报。

当时在总体设计部,仅有一个人对此持不同的意见,认为:全弹试车的目的是验证各系统的协调性和适应性。由于"东风 2 号"甲与"东风 2 号"在控制动力系统起动、关机程序上没有改变,而在研制"东风 2 号"时,已进行过 8 次全弹试车,对系统的协调性和各系统的适应性已进行了全面的考核。而"东风 2 号"甲所用的发动机系统,也已在发动机试车台上通过全面(额定推力、极限推力、长程)试验,在发动机试车时所测得的振动环境参数的数据没有明显的变化。考虑到全弹试车是检验必然性的故障,因而主张只要进行一次全程试车,这样既可达到全弹试车的目的,又可节省试验费用。当时由于种种原因,这种个人意见总体部没有采纳上报。

在汇报过程中,当钱老得知总体部内对全弹试车方案还有不同意见时,马上建议让持不同意见者也在会上讲讲,大家一起谈谈看法。与会者听了为何只进行一次全弹试车的理由后,经认真研究、讨论,没有提出异议。最后钱老和大家一起进行综合分析后,做出结论:通过大家对两种试车方案进行分析、讨论,对只进行一次全弹试车方案,没有提出有什么不妥之处。既然能够达到试验的目的,通过讨论,统一认识,就定为进行一次全弹试车方案。但要保持全弹试车的产品状态与定型产品状态一致;恒压气瓶代替减压器可行,但一定要参加全弹试车。

实践结果表明,这一决定是科学的,符合实际的。全弹试车成功之后,投入定型批量生产。从 1966 年 8 月,开始进行"东风 2 号"甲导弹定型飞行试验,至 1966 年 9 月完成飞行试验,均获得成功。1966 年 12 月,国家批准"东风 2 号"甲导弹定型,投入批量生产,装备部队。我国开始成为拥有导弹核武器的国家。

另一件事是 1986 春天,在中国的大地上,由 4 位老专家倡导我国发展高技术的建议,得到邓小平同志的支持,后被定名为"863"计划。"863"计划的实施,在航天领域也开始探讨载人航天的发展途径。

载人航天问题当时在航天部和航空部内引发广泛的研讨。航空部主张要搞空天飞机,航天部主张研制小型航天飞机,而在航天部内还有少数同志建议中国载人航天从飞船起步。

1986年6月,国务院领导听取航空部、航天部和国防科工委领导和专家汇报时,两部领导各自坚持本部主张,争论激烈,难以决策。为此,国务院领导决定对两部提出的两种方案再进行论证。在这关键时刻钱老提出:要论证也要将飞船方案一起论证。这对少数建议进行载人飞船研究的同志给予了极大的支持。

1987年1月5日,国防科工委召开首届航天领域情报分析会。我以国务院发展研究中心国际技术研究所客座教授的身份应邀参加会议,并要求在大会上宣读所撰写的《对国外载人航天技术的剖析》报告,会前就将报告呈送到了国防科工委。

钱老也出席了会议。在开会时将我叫到他身边坐下,对我讲他看过我的报告,报告中有一段话是这样说的:“美国挑战者号航天飞机失事,震惊了美国朝野,一时不知所措……可见具有经济、科技、国防实力的头号大国承受全局性风险的能力也是有限的。相对来说,我们承受这类风险的能力要小得多。对此,必须有充分地估计”。钱老对这段关于我国对科技失败承受能力问题的论断,提出了疑问。我马上对此进行了解释,得到了钱老的首肯。在我报告后,钱老做了重要讲话,其中提到:“国际技术研究所钱振业同志所提出的问题,我赞同……我们不但要总结国外成功的经验,也要总结他们失败的教训。看他们哪些是做对了,哪些做的不对”。

钱老对待技术方案中的不同意见,哪怕是少数人或一个人的意见,也从不轻易否定。而是经过认真听取意见,通过讨论,取得共识后,再做出果断地决定。钱老的技术民主作风使我深受教育,永生不忘。要想作为一个能胜任从事航天研制工作的技术领导者,必须要能够善于听取群众中的不同声音,集思广益,并做出果断地决策,才有可能领导大家团结一致,更好地完成任务。一个人的知识和能力是有限的,航天事业的成果是集体智慧的结晶。钱老的技术民主作风已深深地札根在广大航天科技工作者的心中。

五、结束语

钱老早在1982年就说过:“中国航天事业的成就是全国人民支持、千万人辛勤劳动和党、国家领导的结果”。

钱老说:“我作为一名中国的科技工作者,活着的目的就是为人民服务。如果人民最后对我们一生所做的工作表示满意的话,那才是最高的奖赏。”“一切成就归于党,归于集体。”

这发自肺腑之声将永远激励着一代又一代航天人和广大人民群众为党和国家,为社会主义现代化事业做出更大的贡献。

钱老永远是我们航天人的楷模!是广大科技工作者学习的榜样!

敬祝钱老健康长寿!

作者简介: 钱振业 1932年7月出生,辽宁省辽阳县人。研究员。1955年10月加入中国共产党。1957年9月毕业于北京航空学院飞机设计专业,分配到国防部五院一分院一部,先后任设计员、工程组长、研究室副主任、主任。第二代战略导弹总体设计中任型号副总设计师。1983年2月调任七机部五院五〇八所副所长。长征-丙型号副总设计师。1989年9月任航空航天部七一〇所所长、科技委主任。航天总公司科技委委员、载人航天和运载系统组副组长。1987年2月任国家高技术研究发展计划("863"计划)航天领域大型运载火箭及天地往返运输系统专家组首席科学家。

钱学森科学思想对创建发展安全科学学科的影响

刘　潜　袁化临　虞和泳

一、引　言

安全伴随人类活动而产生，是来自人体内部的生理与心理的基本需要，实现安全是人类的本能。科学技术的发展在为人类提供越来越丰富的物质财富的同时，也为人类自身的生存和发展造成困难，导致物与人的冲突，甚至安全灾难。因此，人类对安全的需要程度越来越高，渴望对安全的认识水平向着与同时代的科学技术相称的深度和广度发展，客观上提出了对安全领域认识的理论要求。

人类对安全的认识经历了几个阶段：原始时期出于维护生存的本能，人类在解决生产技术同时，不自觉地附带解决了安全问题，在认识概念上处于安全的自发认识阶段。以蒸汽机的使用为代表的工业革命时期，针对个别生产过程或某类机器设备的局部安全实施专门技术得到发展，人类对安全的认识过渡到对安全的局部认识阶段。20世纪进入大工业时期，生产技术特别是航空、原子能等向复杂、规模和高速发展，系统整体安全成为保障人的身心安全和系统正常运行不可缺少的前提和基础，这个系统代表着满足人类某种需要的应用系统（包括生产、军事以及生活等系统），即针对这个系统全面实现安全，这就是系统安全的认识阶段。但是，要从根本上达到应用系统的动态安全，就需要把安全看作是一个功能系统，通过其各个组成要素之间的功能互补、协调作用，使应用系统整体得到安全优化。这种安全系统认识阶段的历史性标志，是安全科学学科理论的诞生。安全科学学科在我国的创立和发展，与钱学森教授的科学哲学思想、系统科学方法以及科学学理论的影响和直接指导是分不开的。

二、安全科学学科名称确立

我国的劳动保护工作，是中国共产党1925年在苏维埃政权期间确定的一项政策。新中国成立后，“劳动保护”成为该领域的主管部门（劳动部劳动保护局）、科研单位（劳动保护科学研究所）、高等学院设的专业系（劳动保护系）的专用名词术语延用下来。“劳动保护”无论从广义上还是狭义上，都是作为党和国家的政策、指导方针或“保护劳动者在生产过程中的安全与健康”这个关系到亿万劳动者切身利益的福利性事业。人们对劳动保护的概念也仅从其政治意义和在生产中的重要性等应用的角度加以阐述或理解。因而，对“劳动保护”缺乏从科学概念和学科理论上给予系统的探讨和说明，更谈不上对其科学技

术体系结构的建立了。劳动保护的科学理论工作落后,严重制约了它自身的发展和专业人才的培养教育。

20世纪80年代,我国改革开放的形势对该领域的理论发展提出了更高的要求,迫切需要大量高级专门人才,关于劳动保护的科学学科归属定位和培养人才的专业设置等问题理所当然地提到了议事日程。这项工作及时得到了钱老著述的启发、热情关注和实际指导。钱老在给刘潜的亲笔信(未公开发表)中明确指出:“既然提到科学学的高度,就得实事求是,讲学科本身内在联系。我们决不能搞部门所有制,强行把当今归劳动人事部管辖的业务建立一门科学或学科体系。我认为劳动保护工作可以分为两大方面:第一,劳动生产设备及其体系是安全运转,不出爆炸,不出火灾等等 ;第二,生产设备与人如何做到高效能地安全生产。这就涉及到劳动者、人,也就联系到人的生理和心理……”此信一针见血地指出,问题的关键是必须首先找出有关劳动保护的科学概念,然后才能确定学科名称。劳动保护是工作、是政策、是事业,它可以作为政府主管部门的工作,体现一种业务性质的名称。劳动保护工作需要科学,需要规律性理论的指导,但它本身并不能构成一门科学学科,更不能作为学科名称来使用。进一步得到的启发是劳动保护领域的科学内容,只有“安全”的科学概念才能概括;安全的定义应该是:“安全是人的身心免受外界因素危害的存在状态(即健康状况)及其保障条件。”劳动保护领域的科学学科名称只有 “安全科学”才是准确的。安全科学学科的定义应该是:“安全科学是对安全的本质及其运动变化规律的认识”。以钱老的信为转折点,产生了“安全科学”的学科概念,完成了学科名称从“劳动保护”到“安全” 的科学转变。

三、安全科学学科的性质定位

安全科学学科名称确立之后,必然要解决学科的属性和定位问题,即弄清楚安全科学在现代科学技术体系中属于哪个科学部门,其学科性质究竟如何。

钱老针对现代科学整体结构中的科学技术部门分类,指出:“以前传统的观点是:科学部门以对象领域划分,自然科学研究自然界,社会科学研究人类社会。但如此也产生了一个毛病:数学归入自然科学,社会科学就不大用数学。这一缺点已为不少人们认识到了。”因此,提出了建立马克思主义科学学的科学思想,并根据科学技术发展的现状提出用科学技术体系学来研究现代的科学部门。科学部门的划分依据是看问题的着眼点或角度,所有科学研究的对象不再是某一问题的存在领域,而是整个客观世界。钱老的这一科学分类思想,彻底打破了以往按研究领域划分科学学科的局限性,为确定安全科学的综合科学学科性质提供了理论指导。

根据这个思想来分析安全科学的学科内容可以看出,安全科学是以人类免受外界因素危害的存在状态为看问题的角度,以实现安全保障条件为着眼点的一个相对独立的科学领域。它的科学学科是将人类社会的全部活动和活动过程作为自己的对象领域加以研

究,揭示安全的内在本质与普遍规律,并运用这种规律的理论和方法去解决具体应用领域中不同活动模式与机制转换中的安全问题。这个新的科学部门,既不同于单要素的数、理、化、天、地、生这样的纵向科学部门,又不同于双要素的如物理化学、化学物理等简单交叉学科的科学部门;它既涉及到自然科学又涉及到社会科学,无法简单地将其归属于自然科学或是社会科学,具有高度综合和跨学科的性质。安全科学正是从人类生存与发展的身心保障需要出发确立的综合科学知识体系。环境科学、管理科学、劳动科学等也同样属于这种性质。这类科学部门的共同科学属性,都是根据某个特定目标作为看问题的角度和运用几乎所有科学的方法、手段、措施去解决该学科领域问题的综合科学部门。综合科学研究领域的发现,不仅对确定安全科学具有综合科学的性质,而且对科学分类都具有重大意义。中国科协主席朱光亚教授在 1994 年 6 月中国科协召开“学科发展与科技进步研讨会”的书面发言中指出:“1993 年 7 月 1 日开始实施的国家标准《学科分类与代码》中,实现以‘安全科学技术’为名列为该标准的一级学科(代码 620),为在学科分类中打破自然科学与社会科学的界线,设置‘环境、安全、管理’综合学科,从而在世界科学学科分类史上取得突破作出了贡献。”

四、关于安全系统科学的研究

钱老提出的系统科学思想和系统工程的科学方法完全适用于安全科学。

安全科学学科与所有综合科学学科一样,都是靠建立自身功能系统来实现人类某种特定需要的。该类科学学科科学技术常常是渗透在人类参与的各种一般组织或机构系统(包括物质系统或信息系统)中,形成自身特定的功能系统,并通过利用这一般系统来实现自己特定功能系统的目的,达到并满足人的特定需求。例如,安全系统就是由人、物、人与物的关系这三个基本要素组成的非线性复杂巨系统。三要素在表现形式上有不同的特点,独立存在、互不可取代、构成缺一不可,但彼此能互补的安全系统整体。安全系统具有包括集合性、相关性、目的性、动态特性、反馈特性和随机特性等在内的系统的基本特征。系统的第一个要素是人,人是安全的主体。“以人为本”有两层含义:第一,安全是为了人,要从考虑人体的特点,即针对人的身心两个方面的需要而提出;第二,人是实现安全的具有能动性和最活跃的一个要素。安全的第二个要素是物。物质通过它的种类、性质、剂量大小和作用时间长短,直接或间接作用于人,人既受害于物,又可以通过物的技术去实现安全而得益于物。这里,人、物是安全系统中的直接要素。安全的第三个要素是人与物(含人与人、物与物)的关系。该关系是通过安全的管理、经济、文化、教育、法规、伦理道德等社会形式去调整,是安全的本质与核心所在,是社会物质活动正常运转的必要条件,同时又是实现安全的手段。

安全系统中诸要素按内在联系规律互相关联,互相制约,互相补充。这种功能作用是通过前边的三个要素实现的。第一,在于运筹,即物与人所处的位置是否使人安全;第二,

要使物的位置始终保持在人的安全范围内，需要通过信息去把握，因为人与物的存在状态会随着时间的迁移而变化，必须通过这个非物质性因素的联系才能实现；第三，通过运筹与信息的结合实现安全控制。再通过安全系统工程的规划、设计、运作与评价等反复迭代的持续实施与改进，达到安全的自组织——良性循环的最佳状态。

五、安全科学学科体系形成

钱老运用马克思主义哲学观点提出现代科学技术体系结构理论，是对建立安全科学学科科学技术体系的有力支持。钱老认为："从应用实践到基础理论，现代科学技术可以分为四个层次。首先是工程技术这一层次，然后是直接为工程技术作理论基础的技术科学这一层次，再就是基础科学这一层次；最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。这也可以看作是四个台阶，从改造客观世界的实践技术到最高哲学理论，可以算是横向的划分。"并认为这个认识过程是双向而不是单向的，科学认识的深化层次呈阶梯式排列，反映出人类思维活动由浅入深或由深至浅的两个运动方向，构成了学科科学技术体系的基本内容。

根据钱老的这一思想，安全科学学科科学技术体系横向划分的四个台阶是：哲学层次是马克思主义安全哲学，其桥梁是安全观；基础科学层次是安全学；技术科学层次是安全工程学；工程技术层次是安全工程。这四个台阶，既有从安全哲学到安全工作方向的实践认识，又有从安全工作到安全哲学方向的理论升华。安全工作表明作为安全主体的人，在具体的安全实践中做什么；安全工程是指导人在具体安全实践中应该怎样做，包括实现安全的方法、手段和措施；安全工程学是论证在具体安全实践中为什么要这样做，提出安全技术和安全卫生的工作原理；安全学是揭示为什么这样做的规律，反映客观世界的规律性；安全哲学是对安全主体在具体安全实践中为什么这样做的规律的本质认识，体现了客观世界的本质并且由此概括出一种科学的思想方法，形成一种科学的思路。因此，从安全工作、安全技术到技术原理，然后再上升到安全的科学基础理论，最后通过安全观升华为安全哲学思想，体现了安全科学学科理论从具体的感性认识到抽象的理性认识这样一种思维模式。

安全科学学科科学技术体系纵向分支的划分，是以安全结构理论即"三要素及其系统"学说(由所含的四个因素构成纵向四个分支学科)为基础，表现在基础科学、技术科学和工程技术三个层次上，并形成安全工程学科、专业教育的三个层次：培养安全科学基础理论研究人才的博士研究生教育、培养安全技术科学研究人才的硕士研究生教育、培养侧重各类行业安全技术与管理工程和安全监督监察等安全工程专业技术人才的本科和专科教育，使安全科学技术充分发挥其科学的社会功能。

六、结束语

在钱老的热情帮助和指导以及他的科学思想的影响下，安全科学学科从创建到发展，

不仅在学科理论及其科学技术体系结构建设方面,并且在国内的社会实践方面取得阶段性标志如下:

(1)1983年9月,成立"中国劳动保护科学技术学会"。

(2)1984年底,中国科学技术协会常委会通过"中国劳动保护科学技术学会"加入中国科协,成为该协会团体成员。

(3)1986年,完成安全工程学科专业学士、硕士、博士三级学位教育。

(4)1989年,"劳动保护科学(安全科学)"在《中国图书馆分类法》(第三版)中取得与环境科学并列为X类,并在第四版中修订为"安全科学"。

(5)1991年,创办国内外第一个以安全科学命名的《中国安全科学学报》一级学术刊物。

(6)1992年,在国家标准GB/T13745-92《学科分类与代码》中,"安全科学技术"被定为一级学科(代码620)。

(7)1997年,人事部与劳动部共同颁布《安全工程专业中、高级技术资格评审条件(试行)》,在我国34种工程技术人员职业中单列安全工程师专业技术职务。

安全科学学科理论及其科学技术体系的创建与发展至今,之所以能在社会实践中取得丰硕成果,应归功于钱老的科学思想指导、科教界的支持以及全国安全界同仁的共同努力。

参考文献

1 钱学森.现代科学的结构——再论科学技术体系学·论系统工程.长沙:湖南科学技术出版社,1982.296~297

2 钱学森.人体科学与现代科技发展纵横观.北京:人民出版社,1996.34~43

作者简介:刘潜 1933年生于山东沂水,50年代留学苏联,回国后,先后在北京大学、劳动保护科学研究所从事科研和研究生教育工作。1984年调入中国劳动保护科学技术学会任专职理事、常务理事、专职副秘书长(第一、二届),现为该学会副理事长(第三届)、中国科协工程学会联合会委员、安全工程专业教学指导委员会委员、中国地质大学(武汉)和首都经济贸易大学等6所院校兼职教授、中国香港安全工程学会荣誉科学顾问。先后以"安全科学开创者"和传播者,获政府特殊津贴和全国科普工作者称号。1985年,在我国首次提出安全科学学科理论及其科学技术体系结构框架,出版《从劳动保护工作到安全科学》论文集,讲授安全科学、安全科学学、安全科学理论基础和安全科学原理等科普和硕士、博士学位课程。

袁化临 1982年1月毕业于大连工学院机械系起重运输专业,获学士学位,毕业后一直从事高等学校教学工作。现在首都经济贸易大学安全工程系安全工程专业教研室任教,为副教授,硕士研究生导师。主要研究领域有安全科学基础理论、机械安全、起重安全等。参加部级科研项目多次,在国际会议和国内刊物发表论文多篇,编写有关大学教材、书籍多本。

热心航空科普的大科学家

谢　础

在我国著名科学家中,钱学森对科普的重视和支持,是人所共知的。他说过:“人民给了我们科学知识,作为一个科学家,有责任再把科学知识还给人民,这是我们义不容辞的社会义务。”我自已在从事科普工作的几十年间,与他有过不少接触,耳濡目染,留下了深刻的印象。

第一次见到钱学森,是在1956年,当时我在北京航空学院喷气发动机设计专业上三年级。5月27日至31日,学校举行第一届科学讨论会,钱学森应邀到会,在北京航空学院体育馆为一千多名师生作了题为《航空技术展望》的学术报告。那时他回国不久,虽然年过不惑,但是看起来显得年轻,神采奕奕。他在报告中回顾了世界航空科学技术发展的历史,对流体力学、结构材料、喷气动力、新机研制等航空领域关键技术的现状与展望,作了深入浅出的介绍,内容丰富,语言生动,受到师生们的热烈欢迎。对我们学生来讲,他从国外带回来的最新航空发展信息,又涉及这么宽的专业面,听完后大家感到开阔了思路,都热烈鼓掌。

钱学森对于年轻的科技工作者,不仅热心传授科学技术知识,而且十分重视科学思想和科学方法的培养。1961年底,钱学森应邀在中关村中国科学院礼堂,为北京市力学学会组织的青年科技人员,作了一场精彩的报告。他以自己的亲身经历和体会,勉励青年人要以老实的科学态度,做扎实的基础研究;他特别强调要学习辩证唯物主义的思想方法,树立科学的宇宙观,勇攀高峰,我听了很受教育。那时我是《中国青年报》的通讯员,就根据自己听讲的笔记,整理成文送给编辑部参考。该报看到后,认为钱学森的这篇讲话,对全国青少年都有教育意义,就以《打好基础,艰苦劳动,发展祖国科学技术》为通栏标题,用大半版篇幅,发表在1962年1月4日的《中国青年报》上,在读者中引起很大反响。后来这篇稿子被该报评为当年通讯员好稿的第一名。

1963年2月,科学出版社出版了钱学森编著的《星际航行概论》。这本书16开精装,34万字,全面介绍了运载火箭和宇宙飞船的设计、制造、飞行轨道、控制系统、通信导航、空间环境、再入返回等各方面的基础知识,内容深入浅出,循序渐进,启迪思想,是学习航天科学技术的入门佳作。那时我为了给北京航空学院一年级同学开设《航空概论》课,正在该院飞机系和火箭系旁听飞机设计、火箭设计、天体力学等专业课程,但是优秀的参考书很难找。有一次在新华书店见到这本《星际航行概论》,如获至宝,赶紧买了回来,仔细研读,受益匪浅。这本书是在钱学森几年来为国防部五院等单位科技人员讲课的讲稿基础上整

理出版的。由于他长期侨居国外,对中文难免生疏。在学习过程中,我发现书内有的词句中文表述欠妥,有语病,就不惴浅薄,在书上一一作了修改,寄给钱学森参考。他收到后很重视,交给五院的朱毅麟等同志,让他们认真校核。科学大家这种虚怀若谷、实事求是的态度,使我很受教育。

为了筹备中国航空学会的成立,使我有机会面谒心仪已久的钱学森。1963年,我两次陪同北京航空学院副院长、中国航空学会筹委会主任沈元教授,前往国防部五院拜访钱学森,向他介绍学会的筹备情况,征求他的意见。钱学森在他的办公室,同我们亲切交谈;他对学会的成立表示支持,就有关问题交换了看法。例如学会的名称,要不要像美国AIAA那样,称为"航空宇航学会"?因为参加学会的科技人员,不仅有航空方面的,而且也有包括火箭、导弹、卫星等领域的同志,例如屠守锷、庄逢甘等专家,都参与了航空学会的筹备。钱学森考虑以后,认为学会包括"航空气"和"航空间"两部分,可以简称"航空",这是中文的一种简洁表达,因此名称仍以"中国航空学会"为好;不过,为了不使外国人误会,学会的外文名称,还是应该包括Aeronautics和Astronautics两部分。

钱学森认为,科学普及是学会的一项重要任务,要加以重视。因此在11月24日在对他的第二次拜访中,沈元教授让我向他详细汇报了科普杂志《航空知识》的情况。这个刊物是由北京航空学院在1958年创办的,1960年4月号曾发表过钱学森撰写的《苏联火箭技术的跃进和宇宙航行的前景》一文。三年经济困难时期由于纸张紧而停刊。在筹备中国航空学会的过程中,1963年已由中宣部批准,准备复刊,聂荣臻元帅建议复刊后的刊物可以交给学会主办,作为向广大群众普及航空知识的桥梁。我请钱学森为学会主办的《航空知识》第一期写发刊词,他欣然应允,写了一篇热情洋溢的短文,发表在《航空知识》1964年1月号上。文章说:

"古人没有精确的测量方法,不可能知道天有多高;看到空中的飞鸟,而想出嫦娥奔月的神话故事。他们把在空气中的飞行,与在大气层外的飞行混淆起来,不知道这两件事是多么不一样。

从本世纪初发展起来的航空技术,实际上是航空气的技术,离地面不过十几公里,比起地球半径的6400公里,简直是贴地面的飞行。即便如此,这门航空技术也大大地影响了人类的社会活动,成为本世纪前半叶的一项伟大的科学技术成就。

受过伟大的列宁教导的苏联人民,在斯大林领导下奠定了雄厚的科学和工业基础,从而在50年代后期一举成功,开辟了人类进入太空的新纪元,开创了航空间的技术。今天我们说的航空技术,必需包括航空气和航空间这两个部分,即从地球表面起,一直到整个的约120亿公里范围的太阳系,都是人类活动的场所了。所以航空技术是现代科学技术的一个重要组成部分。

我国人民在中国共产党和毛泽东主席领导下,奋发图强,自力更生,正在从事于伟大祖国的社会主义建设,我们也一定要掌握全部的现代航空技术!除了建设专业的航空技术队伍外,普及航空科学技术知识也是一件非常重要的工作,而后者就是《航空知识》的光

荣任务。

作为一个力学工作者,我的工作与航空技术有着密切的联系,因此对《航空知识》的复刊感到特别高兴,并在此表示祝贺,祝《航空知识》在这一项重要的科学技术普及工作中取得成就。"

1964年2月20日至29日,中国航空学会成立大会在北京举行,钱学森应邀在29日的闭幕式上为全体代表作了长篇学术报告。他在报告中对学会成立表示热烈祝贺,并寄予殷切的期望。报告后,我陪钱学森到友谊宾馆礼堂的贵宾室休息,并向他请教如何办好航空科普刊物。

他说,看了复刊后的这个杂志,内容很好,版面、美术也很受欢迎,我已经写信给《科学大众》,让他们向《航空知识》学习;现在的问题是要精益求精。他说科普杂志是办给广大群众看的,要有正确的立场和观点,要经常学习领会中央的方针政策,把它贯彻到编辑计划中去。他认为一个刊物要有自己的特色,特别是要同西方资产阶级的办刊思想划清界限,不要人云亦云。他答应以后会写信或打电话提出意见,我们有什么问题也可以随时找他。我请他继续给杂志写稿,他也答应了;不过他自己太忙,就指导五院的朱毅麟等几位年轻同志,写了"漫谈星际航行的近况与前景"系列三篇文章:《星际航行的基础和代价》、《人可以上月球吗?》和《星际航行的下一步》,在1964年的《航空知识》上连载。文章署名"钱星五",隐含"钱学森指导下五人合写星际航行科普作品"之意。他们在文章中预期的人上月球,已在20世纪60年代末实现;而人类登上火星的梦想,也将在21世纪内成为现实。

"文化大革命"开始后不久,全国性学会被迫停止活动,科普杂志也被迫停刊;一直到1973年,由叶剑英、李先念、余秋里等中央领导同志批准,中国航空学会恢复了活动,《航空知识》也可以恢复出版。那时全国百刊凋零,作者也不敢写稿,我们又求助于钱学森,向他约稿。他很快指导国防科委情报所的几位中青年科技人员,合写了题为《航空·航天·航宇》的长篇科普文章,发表在《航空知识》1974年1月号上。这篇文章首次提出划分三个技术名词的涵义概念,即:把在大气层内的飞行活动称为"航空";把大气层以外、太阳系以内的飞行活动称为"航天";把飞出太阳系,到广袤无垠宇宙空间的活动称为"航宇"。这是"航天"这个词在国内报刊上首次面世,对推动我国航天技术名词的统一,起了积极作用。

但是,当时在七机部、五院等部门的人员中,对这个词的使用也有不同意见,全国以至海外华语地区,仍在混用不同名词。有鉴于此,1976年1月,钱学森给《航空知识》编辑部写信,推荐朱毅麟写的《关于使用"航天"名词》一文。信中说,他认为"航天"这个词值得推广,这篇文章写得也不错,说明了采用这个技术名词的理由,建议能在《航空知识》上发表,以广为宣传。我们把朱毅麟的文章编发在1976年3月号的杂志上,起到了很好的宣传效果。1982年5月4日,第五届全国人大常委会第二十三次会议决定,将第七机械工业部改名为航天工业部,"航天"这个词终于被国家最高立法机关采纳。1986年,我收到一位美籍华人朋友的来信,说台湾的《中央日报》主笔,也在他们的报纸上采用了"航天"这个词。正

好《北京晚报》来约稿，我就写了一篇题为《“航天”新词渡海峡》的文章，回顾“航天”这个名词的诞生以及在国内普及推广的经过，发表在8月27日的《北京晚报》上，《人民日报》随即予以转载。朱毅麟后来告诉我，“航天”这个词，最早就是由钱学森提出来的。

从20世纪70年代《航空知识》恢复出版，到80年代初期，每年的选题计划，我们都要寄给钱学森征求意见；他也常写信来给予指导。他希望我们不仅要普及知识，也要推广群众性的航空活动，例如他在一封信里这样写道：

“我要向同志们检讨！去年我在你刊选题计划上写了‘用马克思列宁主义、毛泽东思想的立场、观点和方法，来总结半个多世纪以来航空技术在资本主义国家和社会主义国的发展，然后明确我国航空事业的任务’。这个题目显然太大，我又未加说明，使同志们难办。现在我来说明一下：我想我们是社会主义国家，应该走我们自己的道路。我们究竟应该怎样让航空技术为我国社会主义建设作出更多的贡献呢？第一位的当然是加强国防力量。第二位的是民航。但是还有一个大问题，是如何发动全国人民来发展航空事业。光靠航空工业、空军和民航的工人、干部、指战员、科技人员，似乎还不够。

有没有发动更大范围的人民群众的可能？这就要看航空技术能不能和我国的经济建设实践联系起来。例如飞机在农业生产、石油勘探等方面能够发挥重要作用，此外一定还有许许多多其他方面的应用。由于有这么广泛的应用，到2000年，我们要有几万架直接为工农业生产服务的飞机、直升机！如果这个前景是对的，那就应该让民用工业以至县办工业去造、去维修这种(当然是低速的)飞机和直升机。能造滑翔机的地方也能造这种飞机；能造摩托车发动机的地方，也能造小型活塞式航空发动机。这样，航空技术就在日常生活中同亿万群众联在一起了，我国的航空事业也就有了广泛的基础。”

“我去年说的总结外国经验，找出我们自己的路，主要想的是以上讲的这个问题。不知道这样看问题对头不对头？我向同志们请教，错了请批评。如果说的是对的，那么《航空知识》就要宣传飞机在工农业生产上的应用，就要宣传‘土法’造飞机。关于这个‘大题目’就说到这里。《航空知识》复刊以来是越办越好的。祝同志们在新的一年里取得更大的成绩。”

钱学森关于大力普及通用航空的思想，也跟我当面谈过。1978年3月，党中央召开全国科学大会，人民解放军和国防工业部门的代表团，都住在北京军区西山招待所。有一次开会，我正好坐在钱学森旁边。我问他《航空知识》看到吗？他说每期都看。问他有什么意见？他说：“农业飞机要大力宣传。这种小型飞机不一定都要三机部的工厂生产，地方上的民用工业也可以搞。美国最近还向波兰购买农业机。”

1982年8月，北京航空学院研制的单座超轻型飞机“蜜蜂2号”首飞成功。这种飞机结构简单，使用方便，也可以在农林方面使用；我写了一篇该机试飞记，发表在《航空知识》当年11月号上，文中引述了钱学森那封关于我国需要几万架通用航空飞机的来信。杂志出版后，收到钱学森秘书王寿云的来信，说：“感谢你在刊物上公布钱学森同志的这一观点。这期杂志在我们这里引起很大反响，大家争相阅读”。

1979年10月11日至17日，钱学森在北京京西宾馆主持召开“系统工程学术讨论会”，受到国务院、中央军委领导的重视。王震副总理、军委耿飙秘书长出席开幕式，国防部长张爱萍、副总参谋长李达到会讲话。17日上午，钱学森在闭幕式上作了《大力发展系统工程，尽早建立系统科学体系》的报告。他在报告中讲到建议成立中国系统工程学会，出版普及刊物时说：“参加这次会议的有《航空知识》的谢础同志，他这个刊物办得好，大家爱看；我们系统工程也可以办一个，同《航空知识》比赛！”这时全场活跃。在这样几百人的学术大会上，提出办好科普刊物，充分说明钱学森对科学普及工作的关注。

钱学森也是科教电影的热心支持者。1960年，文化部和中国科协联合成立“科学技术电影委员会”，钱学森担任委员，曾帮助制定科教电影的规划和选题。1978年全国科学大会期间，上海科学教育电影制片厂编导叶永烈找我，要我协助他拍摄一部航天方面的科普电影。我建议他找钱学森请教。过了半年，叶永烈又到北京找我，说关于这部电影已经通过文化部打报告，国防科委表示支持，七机部也同意拍摄部分国产卫星实物和设施。这将是我国第一部大型彩色航天科教片，取名《向宇宙进军》，分3集，分别介绍运载火箭、人造卫星和载人飞行，每集半小时。上海科学教育电影制片厂聘请我担任该片技术顾问。

1979年2月底，钱学森在上海接见该片摄制组全体同志，畅谈了一个晚上。他认为这部航天科教片应当有中国的特色；他以自己科学和艺术结合的修养，为影片设想了这样的片头。他说：“开头，是对于太空美好的幻想。我设想，一开始，就是发射卫星这个场面，很雄伟，很壮观，喷出火焰，声音很响。火箭发射后，变成小点，越来越小，声音也越来越轻。然后，出现古代的飞天幻想，配上古典音乐、古筝，引入古代的文物，无非是画、诗，诗情画意，但是要按时代顺序来排。”他希望影片要着重介绍各种应用卫星与国民经济的密切关系。叶永烈想请钱学森担任影片的总顾问，钱学森推辞了。他说，谢础是我的老熟人，有他担任技术顾问，可以给你们讲很多。影片样片出来后，1979年4月27日和9月8日晚上，分别在七机部小礼堂和文化部电影局举行了两次审片会，钱学森都参加了。出席观看的还有国防科委和七机部的部分领导同志。这部影片引用了一部分国产火箭、卫星的实物镜头，还有宇航员的训练情况，这在当时航天界严格保密的情况下，是很不容易的。后来影片又作了几次修改，于20世纪80年代初在全国公映。

作者简介：谢础　北京航空航天大学教授，《航空知识》主编，中国航空学会名誉理事，中国期刊协会常务理事，中国科普作家协会副理事长。

心系中华盼国强　热爱科技颂进步

张建舟

我在航天第三研究院工作了36年，虽然一直在北京，但至今未能与钱学森先生面谈过，仅仅在开会时两次听过他讲话，但是钱学森先生对我的影响很大。当我1954～1960年还在中学读书时，曾在一本杂志上看到钱学森先生事迹简介，他学习航空科学技术是为了报效祖国。他搜集各种先进资料，每天研读到深夜11点以后，这成了我们同学的学习榜样。苏联第一颗人造地球卫星的发射成功，更激励和坚定了我立志学习航天航空技术，报效祖国的意愿。西北工业大学宇航学院五年飞行力学和控制专业的学习，使我们对钱学森先生在学术上的成就有了进一步的了解。多年航天工作的耳闻目睹，使我们基层技术人员对钱学森等老一辈科学家的人品学问有了更多的了解。虽然有时不是直接的工作接触。但他们爱祖国、爱科学和勤奋学习新技术，善于自己动笔推导公式，进行计算和分析；以理服人的作风，通过种种途径使我们基层技术人员都能感受得到。

1976年因为某项任务，我们提出导弹驱逐舰上扇面发射飞航导弹的理论和实现方法，导弹出发射筒后可拐弯飞行，得到了宣平、潘荣霖、吴宝初、梁守槃等领导的支持。但在应用正交设计的时候没有运用好。后来承担另一项任务的赵利华、马恒华、王济成等先去找推广正交设计很有成效、在数理统计界颇有声望的的方开泰、张炳辉与我后来也去找方开泰。方开泰与数论专家王元认真分析了5个因素、12个水平以上试验、次数不超过50次的条件，经过100多天的推导和计算，创造性地提出了“均匀设计”的理论并给出了一批均匀设计表。按此表格，赵利华、马恒华、王济成、张炳辉、张建舟、黄树山、柯凡、谷巨卿等给出了三种型号、两种模式的火控系统复杂数学模型。后来分别取得了四发四中和六发六中的打靶好成绩；证明了所采用的其他技术及系统的正确性外，也证明了均匀试验设计法的正确。有关课题均得到了国家奖和部级科技进步奖。

此方法在航天三院别的课题中先后应用成功。1980年王元、方开泰将此方法在《应用数学学报》、《科学通报》上发表后，在生物制药、中药、药剂、药分、药理和石油化工、冶金、机械、电子、纺织等行业上逐步得到推广应用。

1993年8月，航天三院三部邀请方开泰系统介绍均匀试验设计方法。航天、航空、兵器、造船、医药、部队等单位60余人参加了培训班。《科技日报》召开了许多应用过均匀试验设计法的老技术人员开会调查应用情况；听到国外研究方开泰、王元首创的均匀试验设计而投入的人力物力比国内强，英国恰普曼出版社要出版方开泰、王元合著的《统计中的数论方法》时，我立时感到热血似乎在加快流动，冒失地提出我们是否也成立一个均匀设

计学会,加强技术交流,加大推广应用的规模,立即得到大家赞成并共同签名发起。

1993年10月17日,《科技日报》记者刘序盾在《科技内参》1993年15期撰文,《我国独创的"均匀设计法"国际领先,专家呼吁有关部门尽快组织推广应用》,向中央有关部门反映均匀设计的重要性。

1993年11月23日,我在国防科工委(现中国人民解放军总装备部)机关看到钱学森先生11月8日给朱光亚主任的信和机关有关部们领导的批示。钱学森明确表示应支持成立中国均匀设计学会。朱光亚主任11月16日批示"要在推广方面多作实事"。

11月24日《中国科学报》发表记者马春元《基础研究必须参加世界竞争,方开泰、王元首创均匀设计法引起国际数学界的高度重视》的报道。11月25日《科技日报》发表记者刘序盾《我国科学家独创均匀设计法——化繁为简、普遍适用、领先国际,前景可观》报道。11月29日人民日报发表《均匀设计法应用十二年成效斐然,应用开发路遥识马力,基础研究妙笔巧生花》的报道,接着全国各大报均作了报道。

11月28日,钱学森先生在看了我送去的均匀设计及应用成功的有关论文和资料后,应邀在我的航天事业三十年纪念册上题词:理论方法都是死的,而客观实际则是活的,千变万化,所以理论与实际要结合,就必须审时度势,灵活运用,此为成功之要诀。钱学森1993年11月28日"。11月30日,钱学森给王元写信:"……得知其在实际应用中的重大意义,心中十分高兴!……祝贺您们为国家、为世界人类进步做出了重要贡献!"

钱学森先生与方开泰和我并不认识,也无交往。与王元先生50年代因同在中国科学院而认识。有的同事奇怪钱老为何对均匀设计法这么喜爱。其实从信和题词可以看出,心系中华盼国强、搞了一辈子系统工程的钱老,比谁都清楚试验设计方法的重大突破在科学实验和工程实际中的重要性。热爱科学,一心为科学技术进步繁荣,国家强盛而奋斗的人心是相通的,热爱科学的大科学家为科学技术的进步而高兴,为中华民族在科学技术方面的进步奋斗了一辈子的人"利于国家者爱之",对均匀试验设计法在各行业上所取得的每项成就而高兴、而颂扬,乃是其爱国之心的自然流露。

由于钱学森、朱光亚、周光召、梁守槃、庄逢甘、王元、杨乐、郑明等科学家和国防科工委、中国科学院、海军装备部、中国科协、民政部等国家机关有关单位的支持批准,中国数学会均匀设计分会得以成立,均匀试验设计法在国民经济诸多领域取得了公认的辉煌成果 。台湾省的《统计学报》出了均匀设计专题;美国、英国、法国、瑞典、拉脱维亚、德国、俄罗斯、乌克兰、瑞士、日本等国均有学者在从事均匀试验设计法的研究和推广应用工作。在困难和阻力面前,我们深深地感受到了钱学森先生温暖人心的支持的重要性!这也是对全体中国数学会均匀设计分会会员的鼓励。在解决工程课题的时候"审时度势,灵活运用",时提醒着我们技术人员。基层技术人员和普通老百姓都敬佩和感谢热爱科学、心系中华强盛的钱学森先生。

作者简介:张建舟 1940年生于陕西省乾县。1960年陕西省乾县中学毕业,考入西安市西北工业大学

宇航学院,1965年8月分配到航天部第三研究院,先后从事弹道控制和火控系统总体设计工作。任中国数学会均匀设计分会秘书长,中国数学会、中国宇航学会、中国空气动力学研究会、中国造船工程学会会员;曾任航天科技委专业组成员、航天三院高级工程师。8次获国家级和航天部部级与军队科技进步奖,参加《战术导弹飞行力学设计》的编写。发表科技论文20多篇。

钱学森——科技界的一面旗帜

涂元季

钱学森是我国著名的科学家。1991年,在授予他“国家杰出贡献科学家”荣誉称号时,国务院、中央军委的命令是这样评价钱学森一生的成就和人品的:“钱学森同志是我国著名科学家。他早年在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域做出过许多开创性的贡献。1955年9月,在毛泽东、周恩来等老一辈无产阶级革命家的关怀下,他冲破重重阻力,离开美国回到社会主义祖国。1959年8月,他光荣地加入了中国共产党。数十年来,他以对祖国、对人民的无限热爱和忠诚,满腔热忱地投身于我国国防科研事业,为我国火箭、导弹和航天事业的创建与发展做出了卓越的贡献。他潜心研究的工程控制论,发展成为系统工程理论,并广泛地运用于军事运筹、农业、林业,乃至整个社会经济各个领域的实践活动,在我国现代化建设中发挥了重要作用。在发展系统工程理论与实践方面,是我国科技界公认的倡导人。他一贯努力学习马克思列宁主义、毛泽东思想,坚持运用马克思主义哲学理论指导科学活动。他热爱中国共产党,热爱社会主义祖国,热爱人民,充分体现了新中国知识分子的高尚品德,他是我国爱国知识分子的杰出典范。”

本文将重点介绍钱学森是怎样成长为一名著名科学家的,以及他作为一名科学家所具备的崇高品德。

一、良好的家庭与学校教育

钱学森出生在一个知识分子家庭。他父亲钱均夫曾在日本留学历史、地理和教育,民国时期在教育部任职。他懂得现代教育,从小就没让钱学森读私塾,而是接受正规的现代教育。钱学森3岁时随父母进京,到北京后他上过蒙养院(幼儿园),女师大附小(今北京市第二实验小学)、师大附小(今北京市第一实验小学)和师大附中。

这里我要专门说一下师大附中。

在那个时代,北京师大附中的高中文、理分科,钱学森读理科。他后来认为师大附中的教育对他日后的成长有重大影响,是他一生之中难忘的一段经历。钱学森曾回忆说,师大附中的校长林砺儒(当时称主任,解放后曾任教育部副部长),制定了一套以启发学生兴趣和智力为目标的教学方案,很有成效。学生们平时都很自觉,该学习的时间专心学习,该玩的时间就尽情玩耍,从不在临考前加班突击。钱学森每次考试虽名列前茅,但并不刻意追求满分。能考80分以上的就是好学生,但这80分是真正学到的,扎扎实实的知识。

化学老师王鹤清，让钱学森自由地到化学实验室做各种实验，这启发了他对科学的兴趣。国文老师董鲁安，在课堂上除了讲授语文知识以外，还常常用较长时间讨论时事，表示厌恶北洋军阀政府，憧憬国民革命军北上（后来他去了解放区）。他的教育使钱学森产生了对旧社会腐败的深切不满和对祖国前途、人民命运的无比关心。几何老师傅种孙那时已是北京师范大学数学讲师，在中学课堂上把道理讲得很透。钱学森后来认为，在中学听傅老师的几何课，使他第一次知道什么是严谨的科学。而生物老师俞谟（新中国成立后改名俞君适，是江西南昌大学生物系教授）常常带他们到野外采集生物样品，制作生物标本。俞老师培养了钱学森较为广泛的科学兴趣。钱学森对老师们的教诲感激不尽，他后来说："我能为国家为人民做点事，也是与中小学老师的教育分不开的！"

钱学森的父亲对年幼的儿子管教十分严格而又得法，从小培养了他良好的学习和生活习惯。每天按时起床就寝，按时复习功课和休息。出门上学一定要衣着整洁，书包整理得井井有条。回家后衣帽、鞋袜、书包放在什么地方，都有一定规矩，不能乱来。这对钱学森后来在科学事业上严谨仔细、井井有条、一丝不苟作风的形成是有一定影响的。钱学森兴趣广泛，知识渊博，也得益于他父亲从小的启蒙培养。每逢寒暑假，钱均夫都要送儿子拜名师补习各种功课。他那时业余学习过伦理学、音乐、绘画等。伦理学由林砺儒校长亲自授课。钱学森说，他的课讲得好极了，完全是从唯物史观来讲伦理学的；美术老师高希舜是毛主席的朋友，被称为一代国画大师。钱学森的一幅画作曾得到他的赞赏，可惜抗日战争时期丢失了。

这么优越的条件，加上钱学森聪慧好学，又爱博览群书，使他后来不仅在自然科学技术，而且在社会科学，甚至文学艺术等方面都有很高的修养。这些知识同时又启迪了他在科学上的创新。

1929年中学毕业后，钱学森为复兴祖国，决心学工科，考入上海交通大学机械工程系，名次第三。钱学森说，他在上海交大第一年基本上是玩过去的，因为所学功课的大部分，如解析几何、微积分、大代数、非欧几里德几何、有机化学、工业化学、第二外语德语等，在师大附中时都学习过了。当时上海交大专重考试分数，学期终了平均分数计算到小数点以后两位数，大家都为分数而奋斗。那时交大的多数学生分成"北京师大附中派"和"江苏扬州中学派"，都是出类拔萃的尖子，在学习成绩上互相竞赛，各不相让。犹如划船比赛一样，这次"北京派"领先，下次"扬州派"一定要得胜。初入交大的钱学森，对这里的"分数战"虽不甚满意，但也不甘落后，非考90分以上不可。钱学森的考卷总是书写工整，清洁漂亮，连等号（=）都像用直尺画的一样，中英文字写得秀丽而端庄，深得各科老师的赞赏。一次水力学考试，所有试题钱学森全部正确完成。试卷发下来，他发现有一个不起眼的笔误（在运算过程中将"Ns"写成了"N"），老师判卷时未注意到。他立即举手发言，指出自己的错误，并把考卷退给老师。交大当时判卷打分非常严格，老师为这一小错扣了他4分。于是这份96分的水力学考卷被留在了学校，并保存下来。不曾想几十年后，钱学森成为世界著名科学家，这份考卷也成了学校的一份珍贵历史档案，1996年在上海交通大学的百

年庆典上展示出来。

二、广泛而又坚实的科学技术基础

1934年钱学森从上海交大毕业,并考取了清华大学留美研究生。1935年8月,钱学森从上海乘船出国,到美国麻省理工学院(MIT)航空系就读。钱学森这才发现,他的母校上海交通大学完全是按照当时麻省理工学院的模式办的,连教学和实验大纲都一样。所以钱学森对这里的学习环境一点也不感到生疏,学习起来游刃有余。但生活上他却有些不习惯,特别是某些美国人瞧不起中国人的傲慢态度令他生气。一次,一个美国学生当着他的面耻笑中国人抽鸦片、裹脚、愚昧无知等,钱学森立即向他挑战说:"我们中国作为一个国家,是比你们美国落后;但作为个人,你们谁敢和我比,到学期末了,看谁的成绩好?"美国人听了都伸舌头,再也不敢小看中国人了。经过努力,他只用一年时间,就拿下了航空硕士学位,而且成绩比同班的美国人及其他外国人都好。一次,有位教授出了一道很复杂的动力学题,大家都做不出来。一位中国留学生叶玄去请教钱学森,他做了一个巧妙的转换,将这一复杂运算变成了一个简单的代数问题,此题便迎刃而解了。叶玄后来留在美国做科研工作,是台湾中央研究院的外籍院士。另一次,有位教授出了一份很难的考卷,全班大部分人不及格。这在学生中引起了很大的不满,大家认为这样的考试对他们是不公平的,这位教授在有意使他们难堪。经过讨论和酝酿,一部分学生决定去找教授说理。当学生们来到教授的办公室门口时,却发现钱学森的试卷贴在门上。卷面用钢笔书写得工整清洁,每一道题都完成了,而且没有任何错误,没有任何圈改和涂沫的痕迹！前来评理的学生一下子泄了气,不敢再去找教授了。

1936年,钱学森转学来到加州理工学院(CIT)。这所学校强调理工结合,培养的学生既是科学家,又是工程师,钱学森就是在这种环境下成长的。他是航空系的研究生,但数学系的课他也去听。当时数学的前沿,如复变函数等他都进修了。钱老曾说,他在加州理工学院打下了数学基础,以后数学的进展他都能跟上。物理系的课,如量子力学、相对论等他也进修了。甚至化学、生物学的有些课他都去听。他听诺贝尔化学奖获得者L.鲍林的量子化学课,并和鲍林探讨化学的发展,两人成为好友。就这样,钱学森在加州理工学院读研究生期间,就奠定了坚实而又广泛的数理化基础。在加州理工学院他还参加火箭小组的研制工作。他领导设计并组织实施了加州理工学院小型高速风洞的建造。所以,他同时又积累了丰富的工程经验,使他真正成为一个名副其实的"科学家+工程师"。

三、名师的指导加上宽松民主的学术气氛

钱学森在加州理工学院拜世界力学大师冯·卡门为师。钱老说,冯·卡门这个人对物理现象有敏锐的洞察力,他总能抓住事物的本质,给你指出研究方向。而冯·卡门则认为钱学森"很有想像力,他善于将自然现象中的物理图形直观化,并将这种能力与他的数学

天赋很好地结合起来。尽管他还是个青年学生,但已能在一些很难的课题上帮助我澄清自己的一些想法,这样的天才是不多见的"。冯·卡门原在德国哥廷根(Göttingen)大学执教,他来美国后,把欧洲哥廷根学派的良好学风带到了美国。他每周主持召开一次研究讨论会(research conference)和一次学术研讨会(seminar)。这些活动强调学术民主,不论是专家权威,还是普通研究生,大家一律平等,都能畅所欲言,发表自己的学术论点。这给年轻的钱学森提供了锻炼创造性思维的良好机会。在一次学术讨论会上,钱学森刚刚念完自己的论文,就有一位长者站起来提出不同意见。钱学森不同意他的观点,两人一时争论起来,面红耳赤。事后冯·卡门问钱学森:"你知道你是在和谁争论吗? 那是大权威冯·米赛斯(von Mises)。但是,你的意见是对的,我支持你"。在另一次学术讨论中,钱学森却和他的老师冯·卡门发生了争论。他坚持自己的观点,毫不退让,令冯·卡门十分生气。他把钱学森拿给他看的论文稿往地上一丢,拂袖而去。老师走后,钱学森默默拾起稿纸,但他内心并未屈服,在科学问题上,他绝不会轻易放弃自己的观点。然而事后这位世界级大权威经过思考,认识到在那个问题上他的学生是对的。于是第二天一上班,他便亲自爬了三层楼梯,来到位于三楼一个旮旯的钱学森的小小的办公室,敲开门,恭恭敬敬地给钱学森行了个礼,然后说:"钱,昨天的争论你是对的,我错了。"冯·卡门的博大胸怀令钱学森十分感动,并终生不忘。他回国后,一直极力倡导在学术上要发扬民主,并身体力行。

四、爱国知识分子的典范

20世纪40年代末,在他获知祖国即将解放的时候,是不惜冒着生命的危险力争回国的。

早在1947年钱学森回国探亲期间,国民党政府就通过胡适出面,邀请钱学森回国出任北京大学校长或上海交通大学校长等职,被钱学森拒绝。他后来说,当时在那种形势下,他不愿回来为国民党装点门面。但到1948年,祖国的解放事业胜利在望,钱学森便开始准备归国。为此他首先要求退出美国国防部空军科学咨询团,但直到1949年才得以实现。他兼任的美国海军炮火研究所顾问的职务,也是到1949年秋才辞去的。

1949年5月20日,钱学森收到美国芝加哥大学金属研究所副教授研究员、留美中国科学工作者协会(简称留美科协)美中区负责人葛庭燧(曾任中国科学技术大学教授,刚去世不久)写来的信,他在信中同时转来1949年5月14日曹日昌教授(中共党员,当时在香港大学任教)写给钱学森的信,转达即将解放的祖国召唤他返国服务,领导新中国航空工业建设之切切深情。这时钱学森还看到周培源给林家翘的信,得知解放前夕解放军已占据北京西郊,也见到在加州理工学院当研究生的罗沛霖(曾经以非党技术人员身份在延安工作过)。罗沛霖认为钱学森回国为解放了的祖国服务的时候到了。钱学森遂加紧了回归祖国的准备,以便实现他多年的夙愿。他对妻子蒋英说:"祖国已经解放,我们该回去了。你现在正怀孕,行动不便,等孩子生下来,我这个学期的书刚好教完,那时我们就回祖

国去。”

但这时美国正值麦卡锡主义横行,全国掀起了一股要雇员们效忠政府的歇斯底里狂热。几乎每天都发生对大学和其他机构进行审查或威胁性审查的事件,加州理工学院也未幸免。20世纪30年代,钱学森由F.J.马林纳介绍,曾参加过当时加州理工学院的马列主义学习小组,结识了该小组的书记、化学物理助理研究员S.威因鲍姆(Weinbaum)。小组曾学习过恩格斯的《反杜林论》;每星期例会常讨论时事,主题是反法西斯和人民阵线;小组还参加过美国共产党书记E.白劳德(Browder)的几次讲演会。这时马林纳已逃到法国,威因鲍姆被捕下狱,于是怀疑落到钱学森头上。

1950年6月,两名美国联邦调查局的人来到钱学森的办公室,指出钱学森30年代在加州理工学院的几位朋友都是共产党员,而威因鲍姆家的聚会实际上是共产党的小组会议。在1938年小组的一份成员名单里,有一个叫约翰·德克尔(John Decker)的名字。于是,他们指控钱学森化名约翰·德克尔,是共产党员,属非法入境。他们还要求钱学森提供证据,指证威因鲍姆是共产党员。钱学森义正词严地驳斥了这些指控,说他从没有听说过约翰·德克尔这个名字。钱学森更不愿为联邦调查局作证,指控威因鲍姆是共产党员。当年联邦调查局的报告这样写道:“钱学森说,作为一名科学家,他只能根据事实来判断一个人的价值或忠诚,这些模糊的事实无法确认一个人的忠诚或政治信仰,据此,他无法对别人进行臆测”。钱学森的强硬态度使美国当局大为恼火,1950年7月,他们取消了钱学森参加机密研究的资格,移民局要驱逐(deport)他出境。钱学森当即决定以探亲为名回国,并订了飞往香港的加拿大太平洋航空公司的机票,准备一去不返。蒋英则雇了一家包装公司,将他们的家具行李,特别是书籍和资料打包装箱,准备托运回国。但是,美国国防部认为钱学森太有价值了,他们不能放他回共产党的中国。美国五角大楼(即国防部)海军部副部长金贝尔(Dan A. Kimbeel)在获知钱学森要离美回国以后,立即给司法部打电话说:“无论如何都不要让钱学森回国。他太有价值了,在任何情况下都抵得上3到5个师的兵力”。所以莫须有的罪名接踵而至:海关扣压了钱学森的所有行李,污蔑他企图携带“机密资料”出境,触犯了“出口控制法”,勒令他不准离境。尽管钱学森声明,所有带机密性质的东西都锁在办公室的保险柜里,钥匙已交给克拉克·米尼肯(Clark Millikan)。他带走的都是个人物品,他的笔记本、讲义手稿、公开资料等。所谓机密性质的蓝图和密码本,只不过是他手稿中的草图和对数表。但也无济于事,司法部还是签署了逮捕钱学森的命令。

1950年9月7日,听到敲门声,产后刚刚满月的蒋英抱着女儿永真把门打开,门口站着两个陌生的彪形大汉,口称要找钱学森。蒋英看来者不善,未让他们进屋。钱学森从书房出来,问什么事,并在门口和陌生人说了几句话,他们向钱学森出示了逮捕令。于是钱学森转过身,用平静的口气对妻子说:“他们让我跟他们走”。蒋英立即明白是怎么回事了。她给钱学森拿了洗漱用具,抱着哇哇哭叫的女儿,用愤怒的目光,看着丈夫被人抓走。

钱学森被捕以后,蒋英面前剩下的是一个刚满周岁的儿子永刚和一个襁褓中的女儿永真,房屋四周则布满了联邦调查局的特务。这位处于敌人营垒中的中国女性没有掉一

滴眼泪,也没有被吓得手足无措,她立即拨通了加州理工学院校方的电话,告诉他们钱学森被捕的消息。

加州理工学院的同事们听说钱学森被捕,感到极大的震惊,他们都不相信罗列在这位正直科学家头上的罪名,并冒着风险,向蒋英伸出援助之手。校长李·杜布里奇(Lee DuBridge)去华盛顿为钱学森游说,弗兰克·马勃(F. Marble)让妻子奥拉·李·马勃(Ora Lee Marble)代蒋英在家照看孩子,而马勃本人则开着车带蒋英去寻找愿为钱学森辩护的律师。朋友们很快打听到钱学森被关在洛杉矶以南一个叫特米诺岛(Terminal Island)的联邦调查局的监狱里。经过努力,蒋英被允许探监,还是马勃为她开车。蒋英来到这所戒备森严、岗哨林立、荷枪实弹、周围拉着通电铁丝网的"自由王国"中的地狱。好心的马勃看到这种情况,心里发怵,他小声问蒋英怕不怕。蒋英说:不怕,她小时候在中国,就到南京国民党监狱去探视过她的父亲(1930～1932年蒋介石曾把蒋英的父亲蒋百里关押在南京监狱)。蒋英看到钱学森被关在一间昏暗的小牢房里,脸色苍白,面容憔悴,几天时间已被折磨得不成人形。和他说话,他不回答,只是把脸绷得紧紧地点头示意。蒋英心里十分难过,她知道,丈夫已失去了语言的能力。于是她不再多说什么,只告诉他:"该办的事情我都在办"。钱学森点点头。狱警催促时间已到,蒋英只得匆匆离去。

经加州理工学院朋友们的抗议和多方努力,15天后钱学森被保释出狱,赎金1.5万美元,这在当时是一个不小的数字。他又是一位著名科学家,帮助他的朋友之中,多有社会名流。因此钱学森事件在当年曾引起美国社会不小的轰动,新闻媒介争相报道。

出狱几天以后,钱学森才慢慢恢复语言能力,他对那段日子不堪回首。说他作为要犯,被关在单人牢房,不准与别人接触,不准说话,监狱里空气浑浊,伙食极差。更令人不能忍受的是,夜间每隔10分钟狱警就"啪!"一声把电灯打开,弄得他整夜不能入眠。15天的时间,他的体重减轻了30磅。

出狱后他仍无人身自由,在美国羁绊达5年之久。联邦调查局和移民局根据麦卡锡法案,继续对他进行监视和跟踪。按规定每个月他必须到移民局去报到一次,以证明他没有逃离美国。而且圈定他的活动范围只能在洛杉矶,越雷池一步,都要向移民局申报。其间,联邦调查局和移民局为查清钱学森是否共产党员,还多次举行所谓的"听证会",对钱学森进行审讯。然而,在听证会上,他们拿不出一件确凿的证据。雇用的两名证人像两个傻瓜,被钱学森反问得语无伦次。一会儿说:"他就是约翰·德克尔。"一会儿又说:他们不认识钱学森。检察官是一个极端反共的家伙,他在一连串例行提问以后,突然问钱学森忠于什么国家的政府。

律师抗议说:"这个提问对澄清钱学森案没有直接的意义。"

但法官裁定:"抗议不成立。"

于是钱学森略作思考,回答说:"我是中国人,当然忠于中国人民。所以我忠心于对中国人民有好处的政府,也就敌视对中国人民有害的任何政府。"

检察官追问:"你说的'中国人民'是什么意思?"

钱学森答:“四亿五千万中国人。”

检察官紧逼不放,说:“这四亿五千万人现在分成了两部分,那么我问你:你是忠于在台湾的国民党政府,还是忠于在大陆的共产党政权?”

钱学森答:“我认为我已经说过我忠于谁的原则了。”

检察官再问:“你在美国这么长时间,你敢发誓说,你是忠于美国政府的吗?”

钱学森答:“我的行动已经回答了这个问题,在第二次世界大战中,我用自己的知识帮助美国做事”。

检察官穷追不舍,又问:“你现在要求回中国大陆,那么你会用你的知识去帮助大陆的共产党政权吗?”

钱学森毫不示弱,说:“知识是我个人的财产,我有权要给谁就给谁。”

检察官又说:“那么你就不让政府来决定你所应当忠心的对象吗?”

这一下钱学森可抓住了他的把柄,义正辞严地回答说:“不,检察官先生,我忠于谁是要由我自己来决定的。难道你的意愿都是美国政府为你决定的吗?”

检察官狼狈不堪。美国新闻记者则在报纸上惊呼:被审讯的不是钱学森,而是检察官!然而在科学和教育界,正直的科学家和教授们都深信钱学森是无辜的,几所著名的高等学府争相聘他为教授。最后,他还是接受了加州理工学院的好意,继续在那里任教,并将自己的科研方向,转向不带机密性质的理论工作,即工程控制论和物理力学等。

在这5年的漫长岁月里,钱学森在精神上受到极大的压抑。联邦调查局的特务日夜监视着他,监听他的电话,拆检他的信件。他们还不时打来电话,假装找人,或走错了门来核查他是否确在,经常对他家进行骚扰,使他不能安心工作和休息。一次,一个联邦调查局的特务敲开了钱家的门,他一眼看见钱学森,便立即表示歉意:“啊,对不起,先生,我找错门了。”钱学森冷冷地说:“你没有错,先生,我在家好好的,你大可放心了。”他刚转身要走,钱学森又说:“我想,干你们这一行的,应该学得聪明一些,怎么能用欺骗小孩子的办法来对付一位教授呢?”特务满脸羞愧,匆匆而去。有时联邦调查局的特务又假装成记者,“跟踪采访”钱学森,企图从他嘴里套出点什么。对付这一招,钱学森也有自己的“锐利武器”。一天,一个鬼鬼祟祟的人跟踪钱学森,声称他是当地一家报纸的记者,要求采访钱学森出狱后的工作和生活情况。钱学森并不正面回答他的问题,只说:“我没听说过这家报纸,也从来不读那些低级趣味的报纸。”一句话噎得“记者”张口结舌,半天说不出话来。钱学森晚年曾说:“当年我对那些特务毫不客气,总是骂得他们抬不起头。他们知道我的厉害以后,再不敢接近我,只得站得远远地监视。”

1955年5月,钱学森夫妇从一张海外华人的报纸上看到关于中国“五一”节的报道,其中有他们所熟悉的陈叔通和毛主席等党和国家领导人一起站在天安门城楼上,检阅游行队伍的消息。钱学森的父亲钱均夫在杭州“求是书院”读书和教书时就认识陈叔通,两家人可谓世交。这消息使他们十分激动。于是他们商量如何能和陈叔通老先生取得联系,营救他们回国。他们给陈叔通写信,请求祖国帮助他们早日回国。

1955年6月的一天,钱学森和蒋英带着书信,来到一间小咖啡馆,钱学森在门外和特务纠缠,机敏的蒋英立即溜进咖啡馆,将给陈叔通的信夹在给比利时的妹妹蒋华的家书中,投进了邮筒。信寄到比利时,蒋华则将这封不同寻常的信平安地转寄到国内。陈叔通先生收到信的当天,就把它送到周恩来总理手中。1955年8月1日,中美大使级会谈在日内瓦开始。周总理立即指示王炳南大使,以钱学森这封信为依据,与美方进行交涉和斗争。尽管会谈开始时美国大使U.艾里克西斯·约翰逊(U. Alexis Johnson)矢口否认美国政府扣留了任何中国公民,并不肯提供在美国的中国侨民和留学生情况。但当王炳南大使拿出钱学森的信,并当场宣读以后,约翰逊哑口无言了。在这种情况下,美国政府才不得不允许钱学森离美回国。8月5日,钱学森接到美国政府的通知,说他可以回国了。当钱学森夫妇接到这一通知时,其高兴心情是可以想象的,他们立即去买机票或船票。当他们听说最快启航的克里夫兰总统号(President Cleveland)远洋船只剩下三等舱船票时,他们的决定是,不管几等舱船票,只要能早日离美回国就行。

这一天终于盼到了。1955年9月17日,钱学森一家登上了克里夫兰总统号轮船,加州理工学院及喷气推进实验室的朋友们赶到码头欢送他们。码头上挤满了送行的人群和采访的新闻记者。记者们七嘴八舌提了一连串的问题,无非是他为什么会被关押;回国以后有什么打算,等等。他不可能一一回答,便说:"我很高兴能回到自己的国家,我不打算再回美国,我已经被美国政府刻意地延误了我回祖国的时间,个中原因,建议你们去问美国当局。今后我将竭尽努力,和中国人民一道建设自己的国家,使我的同胞能过上有尊严的幸福生活。"听众们注意到,他特别加重了"尊严"(dignity)一词,这其中蕴含了多少内心的痛苦和磨难!由于人群拥挤,一些朋友甚至无法走近他们做最后的道别,钱学森一家只好在甲板上向他们挥手致意。应记者的要求,他们在甲板上照了相。然而照完相,美国当局却向钱学森宣布,他在旅途中不能离船,否则他们将不能对他的人身安全负责。钱学森当然理解这些威胁性语言的含义,就是在船上他仍被当作犯人对待。船到公海,同船归国的中国留学生们(约二十几人)都来看望钱学森一家。他们认为,像钱先生这样的世界著名科学家坐三等舱是很不合适的,于是联合起来向船长提出抗议。船长迫于无奈,才在日本的横滨将钱学森一家从三等舱换到头等舱。中途,船到菲律宾的马尼拉港口靠岸,一群记者拥向甲板,采访钱学森。一名记者问钱学森究竟是不是共产党员。钱学森理直气壮地回答说:"共产党员是无产阶级的先进分子,我还没有资格当一名共产党员呢!"那些记者讨了个没趣,知道从钱学森嘴里捞不到什么东西,都灰溜溜地下船了。

1955年10月8日清晨,经过二十几天的海上航行,略感疲倦的钱学森睁开双眼,隔着舷窗的玻璃,看到太平洋彼岸的巨大岩石渐渐映入眼帘:克里夫兰总统号正慢慢驶入香港。他一下子兴奋起来。而祖国和人民也热切地盼望他的回归。为了钱学森和这一批中国学者及留学生的安全,中国政府通过设在香港的中国旅行社与香港当局联系,派驳船直接到海上去接钱学森等一行人,把他们安全地送到九龙登岸。

火车载着钱学森一家和同船归国的中国学者及留学生们到达深圳。他们被香港警察

"押解"走过一座小桥,对面的海关小楼上,五星红旗在向他们招展,广播里传来了欢迎词。越过一个铁栅门,他们才算真正回到祖国大陆的怀抱。

这就是钱学森回国的曲折经历。他热爱祖国的赤诚之心,对天可表。

五、以献身科学的精神,敢于和善于攀登科学的顶峰

钱学森在开始他的科学生涯时,就下定了献身科学事业的决心。他的博士论文,选择的是高速气动力问题,这在当时就是一个很难的课题。当时飞机的速度日渐增加,压缩性效应(马赫数效应)越来越显著,而压缩性直接影响飞行体表面的摩擦阻力。当马赫数很高时,在边界层内滞迟的气流将会对表面有很高的热量传送。钱老的研究是从空气动力学开始的,他和冯·卡门合作,研究可压缩流体中的边界层问题。冯·卡门开始给钱学森的建议是用 Mises 变换,然后根据不可压缩的解进行迭代。钱老并没有按照老师的建议做迭代的运算,然后交卷完事。而是从一开始就收集和阅读了大量参考文献,写了450页笔记,改正了前人很多不足的地方,然后才整理他的论文,这是钱老博士论文的第一篇。当然,论文的第二篇就提出了著名的"卡门—钱"公式,这是在那个时代设计飞机时,计算作用在机翼上的各种物理量(如升力、阻力、升阻比等)惟一正确而符合实际的公式,这一公式从30年代到50年代,用了几十年,直到计算机发展起来并用于飞机的设计计算为止。

钱学森虽然发展了前人的成就,但他又十分尊重前人的成果,每篇论文后面都详细列出参考文献,绝不贪占别人的成果。钱学森认为,每做一个课题,都要认真做文献调研,仅仅知道在哪里可以找到所需资料是远远不够的,必须切实消化并掌握它们,变成刻记在自己脑海之中,可以反复思考,随时调用和加工的东西。

接着,钱学森将他的科研方向转入固体力学的研究,这是当时航空工业发展中一个迫切需要解决的问题。因为早年的飞机都是木质结构,外加蒙皮。随着飞机速度的提高,这样的结构显然是不行的,于是出现了全金属结构的飞机。但是,金属结构在高速飞行的情况下,由于气动力加热会出现各种问题。所以钱学森又来攻克这一难题。但这方面的问题也很困难,需要有科学的勇气,加上坚忍不拔的努力。比如,钱学森研究薄壁扁壳(针对飞机)和薄壁圆柱壳(针对火箭)的失稳问题。这是一个十分困难的非线性问题,前人也做过许多工作,但其理论结果与实验之间有很大差距。钱学森为攻克这一难题付出了艰辛的劳动。仅现在收集到的手稿就有800多页,而最后发表在《航空学报》上的论文只有10页。他在存放手稿的档案袋上用红笔写了一个英文字:"Final!(结束)"但他立即认识到,在科学上没有什么认识是最后的,所以又立即写下:"Nothing is final(并未结束)"。

钱学森在美国从事的另一项重要工作是火箭导弹的研究。这是20世纪30年代的事。大家知道,在那个时候,研究火箭是登不上科学的大雅之堂的,属于斜门歪道。因为那个时代,研究火箭常常和宇宙飞行这样一些科幻联系在一起。所以,作为一名科学家,把火箭问题作为一个严肃的课题进行研究,在当时是冒着很大风险的。没有一种向未知领域

和传统观念挑战的勇气是做不到的。事实上当时加州理工学院火箭研究小组在开始时只有5个人,这个小组是F.J.马林纳倡议成立的。钱学森在晚年回忆说:“马林纳这个人很聪明,小组的其他几个人动手能力也强,但他们理论上不怎么样,于是找到我,要我帮助他们解决一些理论计算问题,就这样我参加了火箭小组的工作。”

小组成立起来,最大的困难是得不到理解和经费支持,同事们把他们看成一帮“怪人”,他们只好靠打工挣来的钱购买二手材料制做火箭。后来气象专业的一位研究生Weld.阿诺德(Arnold)表示可以给小组提供1 000美元,条件是允许他进行拍照。这微不足道的1 000美元,却成为美国火箭研究小组的第一笔启动资金。得到这笔钱以后,大家立即着手开展工作。钱学森首先对火箭研究的文献进行调研和分析计算,于1937年5月29日向小组提供了一份研究报告,解决了火箭设计中遇到的几个理论问题。报告的内容包括:燃烧室中的温度、火箭的理想效率、燃烧产物膨胀不足和过度膨胀对火箭效率的影响、燃烧喷嘴设计、发动机推力的计算等。这份报告被收进他们的火箭研究课题选集,该选集被小组成员称为他们的“圣经”。到6月份,小组的工作得到冯·卡门的支持:允许他们利用学校实验室的设备进行试验。但是,随后的试验多次失败,并给校园造成了许多灾难性的损失。火箭试验时产生的腐蚀性气体使许多仪器的金属表面氧化,有一次爆炸差一点使马林纳丧生,污染性气体弥漫着办公楼的许多房间,呛得人喘不过气来。冯·卡门不得不把他们赶出屋去,全校师生从此戏称他们是一个“自杀俱乐部”。但是,“自杀俱乐部”的成员们并未因此而灰心丧气,他们把设备搬到市郊一个名叫阿洛约·塞科(Arroyo Seco)的干涸的河床上进行试验,这里后来发展成为著名的喷气推进实验室(JPL),是美国火箭的摇篮。

钱学森勇于创新,敢于向传统观念挑战的勇气,在这些科研工作中得到了充分的展现。

六、严肃认真,严谨细致,一丝不苟是钱学森一贯的作风,一生的作风

钱老治学的严谨作风,从山西教育出版社2000年出版的《钱学森手稿》(1938~1955)一书中可见一斑。比如钱老做火箭发动机燃烧室不稳定燃烧问题研究时,其数据计算得非常精细,有的长达8位。要知道,这样繁重的计算在当时是靠拉计算尺得出的,到后来才有一台手摇计算器。其工作之认真艰辛,不言而喻。从钱老的手稿可以看出,他做学问总是一丝不苟,公式推导十分严谨,列表制图极为规范。他的字写得工整、清秀,很少出现差错,即使有修改,那也是改得清清楚楚,一目了然。

钱学森的认真精神,也有他的特点,那就是他认真起来,毫不讲情面。因为他认为,科学是来不得半点虚假的。在我国“两弹一星”事业中,周总理提出“三高”标准,即“高度的政治思想性、高度的科学计划性和高度的组织纪律性”以及“严肃认真,周到细致,稳妥可

靠,万无一失"的要求。钱学森在领导我国导弹航天事业中,总是严格按照周总理的要求办事,从不放过试验中的任何一点差错。他主持国防部五院的技术工作,在总结"东风2号"第一发的经验教训时提出"把故障消灭在地面"的原则,它已成为一代航天人研制和试验工作的行为规范。所以每次试验,对测试中出现的任何一个疑点,他都要打破沙锅问到底,紧追不放,一直到真正把问题搞清楚,把故障排除,或对出现的异常现象作出科学的、有试验根据的合理解释才肯罢休。当年在基地搞试验的一位老同志说,在一次发射前的测试中,他向钱老汇报氧化剂的加注活门有点漏气。钱老立即问:"有多大点漏气,你们测试过没有?"答:"没有"。于是钱老严肃地说:"你马上回去测,测试清楚了再向我汇报"。经过测试,每分钟一个小气泡,这个指标在允许的范围之内。于是再去向钱老汇报,他才点头认可。类似的事在当时的研制和发射试验中是很多的,他当年在基地一呆就是一两个月,大大小小的事情他都得过问。在钱老的《工作手册》中,每次试验他都有详细记录,甚至把大大小小的异常或故障列出表格,一一落实解决。对已经解决的问题,他注上:"已换",或"已重新调试","可用"等。尚未解决或落实的问题,他在表格中用红笔做个"＊"号,并注明已指定谁协调解决。

由于钱学森的严肃认真,严谨细致,一丝不苟的作风,他带动和培养了一大批人,周总理提出的"三高"标准,成为一代航天人的优良传统和作风。所以在那个时代,虽然我们的技术条件比美国、苏联落后很多,但我们的成功率却比他们高得多。

七、优秀的共产党员,科技界的一面旗帜,全党学习的典范

1. 对金钱的态度

钱学森一生对金钱看得很淡漠。他当年放弃在美国的优厚条件,坚决要求回到各方面都还十分落后的祖国,就是为了和祖国人民同呼吸、共患难,用他的知识和智慧建设国家,使祖国强大、人民幸福。值得庆幸的是,钱学森用他的行动,实践了自己的愿望。

他回国以后,完全靠自己的工资生活,以今天的标准看,那时的工资是很低的,一级教授一个月300元多一点,而且是几十年一贯制。除了工资之外,他还有一些稿费收入,晚年也曾得到过较大笔的科学奖金。但他把自己这一生所得几笔较大的收入统统捐了出去。这包括:钱学森著《工程控制论》1958年中文版稿费(千元以上,这在当时是一笔很大的收入)捐给了中国科技大学力学系,资助贫困学生买书和学习用具;1962年前后,钱学森著《物理力学讲义》和《星际航行概论》先后出版,稿酬有好几千元。这在当时简直是"天文数字"。那时还处在"三年经济困难"时期,人人都吃不饱肚子。钱学森及其家人和全国人民一样,也是勒紧裤带过日子。但是,这么一大笔钱并没有使钱学森动心。当他拿到这两笔稿费时,转手就作为党费交给了党小组长。

1978年钱学森又交了另一大笔党费。当时"文化大革命"刚刚结束,开始落实各方面的政策。钱学森的父亲钱均夫老先生原在国务院文史委员会上班,1969年去世。但因"文

化大革命”的冲击,从1966年起就不发工资了。所以,钱均夫老先生在去世前三年未领到一分钱工资。到1978年落实政策时,给钱均夫补发了3 000多元的工资。然而,钱老先生已经过世,钱学森作为钱均夫的独子,自然有权继承这笔报酬。但是钱学森认为,父亲已去世多年,这笔钱他不能要。退给文史委员会,人家拒收,怎么办?钱老说,那我只有作为党费交给组织。所以这3 000多元也交了党费。

除此之外,1982年钱学森等著《论系统工程》一书,钱学森本人所获稿费捐给了系统工程研究小组;1994年钱学森获何梁何利基金优秀奖100万港元,这是一笔相当大的奖金。这100万港元的支票甚至都未经过他的手,他就写了一封委托信,授权王寿云和我,代表他转交给促进沙产业发展奖励基金,捐给了我国西部的治沙事业。直到我写此文的时间为止,他一生中的几笔大的收入,统统都捐了出去。即使在平时,他和别人联合署名发表文章时,他总是把稿费让给别人,说:“我的工资比你多,此稿费就请你一人收下吧!”钱老对待金钱的态度,读者可以由此得出结论。

2. 对地位的态度

钱学森一生中曾任国防部第五研究院院长、副院长,第七机械工业部副部长,国防科委副主任,国防科工委科技委副主任,直到中国科协主席、全国政协副主席等要职,其地位不可谓不高。但一般人不知道,钱学森对这些“官位”一点也不在意。要不是工作的需要,他宁可什么“官”也不当。他常常说:“我是一名科技人员,不是什么大官,那些官的待遇,我一样也不想要”。所以,他从不爱出席什么开幕式、闭幕式之类的官场活动,只喜欢钻进科学世界,研究学问。在这方面若有所得,就十分高兴。他常说:“事理看破胆气壮,文章得意心花开”。

人们常常不明白,在国防部五院,钱学森为什么先任院长,后任副院长?其实,这就是钱学森和一般人的不同之处。1956年,他向中央建议,成立导弹研制机构,这就是后来的国防部第五研究院,钱学森担任首任院长。但随着导弹事业的发展,五院规模的扩大,钱院长的行政事务也越来越多。比如连人员的住房分配、食堂和幼儿园的建设等都要他亲自过问。但这并非钱学森之所长。与此同时,又有大量技术问题等待他去解决和处理。在这种情况下,他不得不向领导提出,免去其院长职务。周恩来、聂荣臻也很快注意到这种情况,他们接到钱学森的请辞报告后,果断决定,配备强有力的行政领导,解决大量行政、后勤事务,把钱学森从这些繁杂事务中解脱出来,让他集中精力思考和解决重大技术问题。于是1960年3月,国防部任命空军司令员刘亚楼兼任五院院长,空军副司令员王秉璋任五院副院长,主持常务工作。后来,王秉璋又改任五院院和。从此钱学森只任副职,由国防部五院副院长,到七机部副部长,再到国防科委副主任等,专司我国国防科技发展的重大技术问题。钱学森对这种安排十分满意。他考虑的是科研工作,而不是自己因此会失去什么权力,降低什么待遇。这种精神贯穿在他的一生之中。

1981年,当钱学森刚满70岁时,他立即给张爱萍写报告,说他年纪大了,比他年轻的人也都成长起来,他恳请组织上免去他国防科委副主任的职务,并要求退休,还推荐了三

位可以接班的人。张爱萍接到钱老的报告后找他谈话说:国防科委很快要和国防工办合并,成立国防科工委。考虑到你的意见,可以不再任命你担任国防科工委副主任。但是我们的国防科技事业还需要你,你不能退休。将成立国防科工委科学技术委员会,给科工委领导做科学技术的参谋,重大科研项目先由科技委的专家们论证,提出方案,再报请科工委领导批准实施,所以还要请你在科技委继续工作。这样,钱老又在科技委干了5年。到1986年他满75岁,又主动给领导打报告,请求免去他科技委副主任的职务。到1987年才批准他从国防科研的领导岗位上退下来,并被聘为科技委高级顾问。

他出任中国科协三届主席的经历也是曲折的。大家知道,科协是5年一届,而周培源从1980~1986年担任了6年的主席。为什么周老干了6年?就是因为主席的人选达不成一致。大家一致推选钱学森为三届主席,可是钱老坚决不干。记得1985年科协二届第五次全国委员会,一致通过建议,由钱学森任三届主席,他个人还是不同意。一直到闭幕那天,在京西宾馆开闭幕大会,请钱老(他是副主席)致闭幕词。闭幕词的稿写好了,送给他审阅。他看了稿子以后表示,这个稿我原则上同意,但最后要加一段话,让我向大家说明我不能出任三届主席的理由。如果你们同意加这段话,我就念这个稿子,如果你们不同意,我就不念,请别人致闭幕词。科协的同志只好表示:"钱老,您念完这个稿子,可以讲一段您个人的意见,但不要正式写进这份讲稿"。于是钱老同意致闭幕词。我参加了那天的大会,我记得当时的情景是:当钱老说明他不适合担任下届主席时,会场上连续地鼓掌,使他没法讲下去。有人站起来插话说:"钱老,这个问题您个人就别讲了"。大家对他的插话又热烈鼓掌。后来方毅、杨尚昆、邓颖超都出面找他谈话,劝他出任科协三届主席。

就这样,钱老才担任了一届科协主席。1991年,当他任期满了以后,在换届时,他坚决不同意连任,并推荐比他年轻的人担任下届科协主席。

关于全国政协的职务也是这样。大家知道,钱老是全国政协第六、七、八届副主席。当然,第六届他是中间增补进去的。但钱老不算这个细账,他在七届任满时,就给当时政协的负责人写信,请求不要在八届政协安排他任何工作。信的全文如下:

李先念主席宋德敏秘书长:

4月15日上午我在301医院得见洪学智副主席,他嘱咐我要注意休息,切莫活动过多。我当即向洪副主席报告,我早已上书先念主席,请求免去我在全国政协的事,后在一次全国政协主席会上,先念主席答应此事在换届时解决。现在正在进行政协全国委员会换届工作,故我再次提出请求,不要再在八届全国政协安排我任何工作。这是我身体条件的实况。

谨此报告。并致

敬礼!

钱学森

1992年4月20日

但是,这个报告没有被批准,直到1998年全国政协八届换届时,钱老才从全国政协的

位置上完全退下来。

3. 钱学森对待荣誉的态度

第一件事是关于"院士"的荣誉称号问题。钱学森在1988年和1992年曾两次给时任中国科学院院长的周光召写信，请求免去他学部委员（即院士）的称号。这里只引用1992年的信，全文如下：

周光召院长：

近得1992年第6次学部委员大会通过并经国务院同意的《中国科学院学部委员章程（试行）》，看到其中第24条说学部委员可以申请辞去学部委员称号。您是知道的，我前几年即有此意。近日来，更因年老体弱，已不能参加集会作学术及其他活动，故已不能完成中国科学院学部委员的任务。据《章程》规定及个人情况，特申请辞去我的学部委员称号。

以上请您批办。

此致

敬礼！

钱学森

1992年9月21日

信发出以后，钱老告诉我，在一次学部大会执行主席会议上，周院长和严老（严济慈）一起做他的工作。周光召说："钱老，学部委员不是个官位，是大家选的，不是我任命的。我无权批准您的请辞报告"。严老说："我们主席团讨论了，大家一致不同意您的请辞报告"。

第二件事是1991年授予他"国家杰出贡献科学家"荣誉称号的情况。1991年钱老满80岁，正好这一年中国科协要换届，从此，钱学森要退出所有一线科技工作。为了表彰他这一生对我国科学技术事业的贡献，中央酝酿授予他荣誉称号。但整个酝酿过程钱学森一无所知，授奖仪式在10月16日举行。当一切准备就绪之后，在10月10日这一天有关人员才向他本人报告。对于这么高的荣誉，钱学森本人的态度十分冷静，决不因此而忘乎所以。其证据之一是他在授奖仪式上的著名讲话：他并不激动；二是授奖仪式之后，新闻媒体上出现了一个宣传钱学森，学习钱学森的高潮，一些著名科学家，比如钱三强、王大珩、张维等都接受记者采访，谈学习钱学森的体会，航天部、中国科协、国防科工委等单位也作出向他学习的决议。一天上午，钱老把我叫到他的办公室。第一句话就是："你怎么还在忙啊？我们办任何事，都应该有个度。这件事（指对他的宣传报道）也要适可而止。这几天报纸上天天说我的好话，我看了心里很不是滋味。难道就没有不同的意见，不同的声音？"我立即回答说："钱老，既然您说到这里，那么，我如实向您报告：我也听到一些不同意见。有的年轻人说，怎么党的知识分子政策都落实到钱学森一个人身上了？"钱老立即说："你说的这个情况很重要。说明这件事涉及到党的知识分子政策问题。如果它完全是我钱学森个人的问题，那我没什么可顾虑的，他们爱怎么宣传都行。问题是在今天，钱学森这个名字已经不完全属于我自己，所以我得十分谨慎。在今天的科技界，有比我年长

的，有和我同辈的，更多的，则是比我年轻的，大家都在各自的岗位上，为国家的科技事业做贡献。不要因为宣传钱学森过了头，影响到别人的积极性，那就不是我钱学森个人的问题了，那就涉及到全面贯彻落实党的知识分子政策问题。所以，我对你说要适可而止，我看现在应该划个句号了，到此为止吧。我这么说并不是故作谦虚，要下决心煞住，请你立即给一些报纸杂志打电话，叫他们把宣传钱学森的稿子撤下来”。于是我回到办公室，立即照办。比如《光明日报》、《科技日报》等，都表示尊重钱老本人意见，明天不再见报了。有一个杂志，他们也表示尊重钱老意见，但下期的稿子已下厂排版，有两篇回忆与钱老交往中受到教益的文章不好撤下来。打了一圈电话，我到钱老办公室向他反馈信息。当他听到那个杂志这两篇文章无法撤下来时说：“这样的回忆性文章都是在一个人死了以后才发表的，我还没死，他们急什么？”我听了这话，扭头就走，赶紧打电话告诉该杂志的主编：“钱老把话都说到这个份上了，天大的困难你们去想办法克服，但稿子一定得撤”。

以上是关于钱学森对待金钱、荣誉和地位的态度。他崇高的思想境界和高尚品德，使他成为一名优秀的共产党员，科技界的一面旗帜，全党学习的典范。这些品德看来和科研工作没有太大的关系。其实，一个科研人员，如果满脑子都是金钱、荣誉、地位这些东西，即使他很聪明，也成不了大器。科学是需要人们无私奉献的，古今中外，概莫如此。这里，我想引用钱老 1978 年在悼念他的挚友、著名科学家郭永怀时讲的一段话：“一方面是精深的理论，一方面是火热的斗争，是冷与热的结合，是理论与实践的结合。这里没有胆小鬼的藏身处，也没有自私者的活动地；这里需要的是真才实学和献身精神”。这句话既是他对亡友的深切怀念，也体现了他一生崇高的思想境界。

[General Information]
书名=钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集
作者=宋健主编
页数=442
SS号=12852689
出版日期=2001.12